

ISSN 0201–727X

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

ВЕСТНИК

**Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 3 (95)

Ростов-на-Дону
2024

ВЕСТНИК

Ростовского государственного университета путей сообщения

2024
№ 3 (95)

Научно-технический журнал
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи
информационных технологий и массовых
коммуникаций.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

В.И. Колесников, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

К.С. Ахвердиев, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

М.П. Бадёр, д-р техн. наук, проф., Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС),
г. Москва

А.В. Белый, член-корреспондент НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., Физико-технический институт
НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

А.В. Божениук, д-р техн. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Таганрог

М.А. Бутакова, д-р техн. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Ростов-на-Дону

В.Д. Верескун, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.Н. Гуда, д-р техн. наук, проф., заместитель главного редактора, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ф. Даниэль, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет дю Мэн, г. Ле-Ман, Франция

И.Д. Долгий, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

Ю.И. Жарков, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.А. Зарифьян, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.В. Зырянов, д-р техн. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ),
г. Ростов-на-Дону

С.М. Ковалев, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва

И.В. Котенко, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург

А.Г. Кочур, д-р физ.-мат. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Н.Н. Лябах, д-р техн. наук, проф., Международная Академия Менеджмента и Технологий INTAMT,
г. Дюссельдорф, Северный Рейн-Вестфалия, Германия

И.А. Майба, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Э.А. Мамаев, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ю.Ф. Мигаль, д-р физ.-мат. наук, проф., Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

И.С. Морозкин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.И. Новакович, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Ж. Палечек, д-р техн. наук, проф., Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика

А.Д. Петрушин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

Е.С. Свицков, д-р техн. наук, проф., Петербургский государственный университет путей сообщения
(ПГУПС), г. Санкт-Петербург

А. Сладковски, д-р техн. наук, проф., Силезский технический университет, г. Катовице, Польша

С.В. Соколов, д-р техн. наук, проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ),
г. Москва

В.А. Соломин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В. Стыскала, д-р, ассоц. проф., Остравский технический университет, г. Острава, Чешская Республика

В.Л. Сухоруков, д-р физ.-мат. наук, проф., Южный федеральный университет (ЮФУ), НИИ Физики,
г. Ростов-на-Дону

В.Н. Таран, д-р физ.-мат. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ),
г. Ростов-на-Дону

В.А. Финоченко, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

О.Н. Числов, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.Н. Чукарин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.В. Шаповалов, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

В.Л. Шаповалов, д-р техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

И.А. Яицков, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

А.О. Куделина, ответственный секретарь, РГУПС, г. Ростов-на-Дону

VESTNIK RGUPS
Scientific and Technical Journal

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

- V.I. Kolesnikov**, academician of Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- K.S. Akhverdiev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- M.P. Bader**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow State Transport University (MSTU), Moscow
- A.V. Belyj**, Corresponding member NAS of Belarus, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Physic Technical Institute NAS of Belarus, Minsk, Belarus
- A.V. Bozhenyuk**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Taganrog
- M.A. Butakova**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Rostov-on-Don
- V.D. Vereskun**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.N. Guda**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don (deputy editor-in-chief)
- Ph. Daniel'**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Universite du Maine, Le Mans, France
- I.D. Dolgiy**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow
- Y.I. Zharkov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.A. Zarifyan**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.V. Zyryanov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don
- S.M. Kovalev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow
- I.V. Kotenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg
- A.G. Kochur**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- N.N. Lyabakh**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, The International Academy for Management and Technology (INTAMT), Dusseldorf, North Rhine-Westphalia, Germany
- I.A. Mayba**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- E.A. Mamaev**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- Y.F. Migal**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don
- I.S. Morozkin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.I. Novakovich**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- Z. Palechek**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic
- A.D. Petrushin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- E.S. Svintsov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg
- A. Sladkowski**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Silesian University of Technology, Katowice, Poland
- S.V. Sokolov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow Technical University of Communication and Informatics (MTUCI), Moscow
- V.A. Solomin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V. Stýskala**, Doctor, PhD, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic
- V.L. Sukhorukov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Research Institute of Physics, Rostov-on-Don
- V.N. Taran**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don
- V.A. Finochenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- O.N. Chislov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.N. Chukarin**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.V. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- V.L. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- I.A. Yaitskov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don
- A.O. Kudelina**, executive secretary, RSTU, Rostov-on-Don

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Авилов В.В. Оценка комплексного влияния электроискровой обработки поверхности трения и применения пластичных смазок с эффективными присадками на износостойкость тяжело нагруженных трибосистем	8
Воропаев А.И. Повышение износостойкости тяжело нагруженных трибосистем путем применения комбинированных ионно-плазменных алмазоподобных покрытий CrSiAlN + DLC при стабилизации азотом.....	17
Лукин С.А., Васин С.А., Пантюхина Е.В. Методика проектирования универсального механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка	28
Мантуров Д.С., Больших И.В., Больших Е.П. Матричное связующее для антифрикционного полимерного композиционного покрытия.....	36
Пантюхина Е.В., Лукин С.А., Васин С.А. Разработка универсальной конструкции механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка.....	43

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Чепцов М.Н., Сонина С.Д., Ястримский М.Ю. Метод генерации программного кода по параметрам модели нейронной сети	50
Штанке В.В. Методы анализа сигналов магнитоиндукционного датчика при проходе колесных пар подвижного состава.....	56

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Окост М.В., Морозов А.В., Суворова Т.В., Шаповалов В.Л. Исследование влияния циклических воздействий на деформирование грунта в условиях осесимметричного нагружения.....	68
--	----

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Акельев А.С., Король Р.Г. Оптимизация параметров функционирования терминально-логистической инфраструктуры железнодорожной транспортной системы	79
Трапенов В.В. Комплекс проектирования сети узловых логистических грузовых распределительных центров в условиях мультиагентности транспортного обслуживания..	90

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Ворон О.А., Моисеев В.И. Применение тепловых аккумуляторов при перевозках скоропортящихся грузов в изотермическом вагоне.....	103
Элязов И.Ш., Юсифзаде Е.Н., Бахшиев А.Б., Гусейнов И.Д. Методика расчета долговечности колесной пары вагона	109

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Лазаренко С.В.** Синтез интеллектуального закона управления электровозом на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче..... 119

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Никифоров М.М., Шантаренко С.Г.** Обеспечение энергетической безопасности электротяги поездов на железнодорожном транспорте 130
- Осипов В.А.** Интеграция волоконно-оптических линий связи с системой тягового электроснабжения как способ повышения энергетической эффективности железных дорог..... 139
- Риполь-Сарагоси Т.Л.** Исследование энергозатратности процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха при использовании различных модификаций алюмогеля..... 148

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

Avilov V.V. Assessment of the complex effect of electric spark treatment of the friction surface and the use of greases with effective additives on the wear resistance of heavily loaded tribosystems.....	8
Voropaev A.I. Increasing the wear resistance of heavily loaded tribosystems by using combined ion-plasma diamond-like coatings CrSiAlN + DLC with nitrogen stabilization.....	17
Lukin S.A., Vasin S.A., Pantyukhina E.V. Procedure for designing universal mechanical disk hopper loading device with teeth and adjustable orientator for blanks of bodies of revolution in the form of a cap.....	28
Manturov D.S., Bolshikh I.V., Bolshikh E.P. Matrix binding agent for anti-friction polymer composite coating.....	36
Pantyukhina E.V., Lukin S.A., Vasin S.A. Development of a universal design of a mechanical disk hopper loading device with teeth and an adjustable orientator for blanks of bodies of revolution in the form of a cap.....	43

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS

Cheptsov M.N., Sonina S.D., Yastrymkiy M.Yu. A method for generating program code based on the parameters of a neural network model.....	50
Shtanke V.V. Methods for analyzing the signals of a magnetoinduction sensor when passing wheel sets of rolling stock.....	56

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

Okost M.V., Morozov A.V., Suvorova, T.V., Shapovalov V.L. Study of the influence of cyclic effects on soil deformation under axisymmetric loading.....	68
---	----

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

Akeliev A.S., Korol R.G. Optimization of operating parameters of the terminal and logistics infrastructure of the railway transport system.....	79
Trapenov V.V. The complex of designing a network of nodal logistics cargo distribution centers in the conditions of multi-agent transport services.....	90

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

Voron O.A., Moiseev V.I. Application of heat accumulators in transportation of perishable goods in an isothermal car.....	103
Elyazov I.Sh., Yusifzade E.N., Bakhshiev A.B., Huseynov I.D. Method for calculating the durability of a car wheelset.....	109

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

Lazarenko S.V. Synthesis of an intelligent law of electric locomotive control based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem.....	119
--	-----

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Nikiforov M.M., Shantarenko S.G. Ensuring energy security of electric trains on railway transport.....	130
Osipov V.A. Integration of fiber-optic communication lines with the traction power supply system as a way to increase the energy efficiency of railways.....	139
Ripol-Saragosi T.L. Investigation of the energy consumption of the process of adsorption drying of compressed air using various modifications of alumogel.....	148

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.8 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_8

*В. В. Авилов***ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК С ЭФФЕКТИВНЫМИ ПРИСАДКАМИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСИСТЕМ**

Аннотация. Предложена комплексная методика совершенствования узла «пятник – подпятник», включающая обработку поверхности подпятника методом электроискрового легирования в индустриальном масле И-40 вольфрамовым электродом FUBAG и использование пластичных смазочных материалов, содержащих эффективные присадки, способствующие образованию вторичных структур на металлическом контртеле. Проведены трибологические испытания на машине трения с образцами из стали 30X13 после обработки методом электроискрового легирования в присутствии смазочного материала ПУМА-МР. В качестве присадки использован двойной метафосфат кальция и цинка. С помощью методов планирования эксперимента исследовано влияние процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных условий на величину износа. Оптимизация содержания присадки к смазочному материалу позволила существенно увеличить ресурс работы исследуемой фрикционной системы.

Ключевые слова: износостойкость, модификация поверхности, электроискровое легирование, смазочные материалы, трибология.

Для цитирования: Авилов, В. В. Оценка комплексного влияния электроискровой обработки поверхности трения и применения пластичных смазок с эффективными присадками на износостойкость тяжело нагруженных трибосистем / В. В. Авилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 8–16. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_8.

Введение

Для обеспечения эффективной эксплуатации подвижного состава железных дорог необходима высокая надежность узлов трения и повышение их технико-экономических характеристик.

К числу наиболее ответственных и нагруженных элементов вагона относится узел контакта «пятник – подпятник». Этот узел осуществляет связь между кузовом и тележкой и обеспечивает силовое взаимодействие между ними. Конструкции узла «пятник – подпятник» различаются в зависимости от типов и моделей вагонов как формой и геометрическими размерами, так и используемыми материалами. Используемый сегодня во многих грузовых вагонах пятниковый узел достаточно прост в изготовлении, технологичен и легко поддается ремонту. Типовой узел трения «пятник – подпятник» грузового вагона эксплуатируется в условиях граничной смазки, а при выдавливании смазки из-под опорной поверхности пятника – в жестких режимах полусухого трения. С целью минимизации износа пятников грузовых вагонов был предложен целый ряд конструктивных и технологических решений [1–8]. Однако реализация этих решений на линейных предприятиях вагонного хозяйства представляется весьма затруднительной ввиду отсутствия необходимой технической оснастки.

Эффективным путем совершенствования пятникового узла является снижение момента сопротивления, возникающего в узлах опирания кузова на тележки, в том числе применение в узле «пятник – подпятник» износостойких элементов и покрытий из материалов с низким коэффициентом трения и высокой прочностью. При этом вопрос повышения износостойкости должен решаться достаточно простыми техническими средствами, а обеспечение антифрикционности узла также должно обеспечиваться простыми технологическими решениями.

Практика показала, что среди методов повышения износостойкости поверхностного слоя трибосопряжения наиболее перспективными являются: для металлических трибосистем – всевозможные методы модификации поверхности, среди которых наиболее простая и широко используемая для обработки металлических изделий технология электроискрового легирования, а для трибосопряжений, работающих со смазочными материалами, – синтез технологий и материалов, позволяющих получить на поверхности трибоконтakta вторичные структуры – пленки переноса.

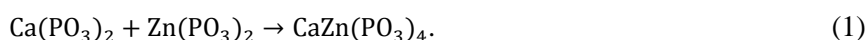
В работах [9–11] заложены основы комплексной методики совершенствования узла «пятник – подпятник», включающей обработку методом электроискрового легирования в индустриальном масле И-40 вольфрамовым электродом FUBAG серии WP и использование пластичных смазочных материалов, содержащих эффективные присадки, способствующие образованию вторичных структур на металлическом контртеле.

Целью настоящей статьи является исследование влияния присадки двойных метафосфатов кальция и цинка в смазочном материале ПУМА-МР в случае использования предложенной комплексной методики совершенствования узла «пятник – подпятник» [4].

Материалы и методы исследования

Объектом исследований выступали образцы из стали 30X13 после обработки методом электроискрового легирования в индустриальном масле И-40. Для ЭИЛ применялся вольфрамовый электрод (содержание вольфрама не менее 99,5 %) диаметром 2,4 мм марки WL1 green WP (Fubag). Использование индустриального масла И-40 эффективно предохраняет поверхность стали и электрода от окисления в процессе ЭИЛ.

Синтез присадки двойного метафосфата «кальций-цинк» осуществлялся по химической реакции:



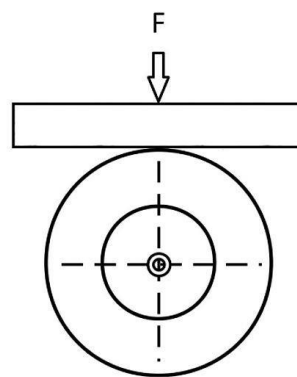
Измельченные до порошкообразного состояния метафосфаты кальция и цинка смешиваются, в платиновом тигле сплавляются в муфельной печи. При температуре 1000 °С расплав выдерживается 2 часа, далее тигель вынимается и резко охлаждается. Полученный метафосфат кальция и цинка представляет собой стеклообразную массу прозрачного цвета, которая измельчается до порошкообразного состояния, готовое вещество – это порошок белого цвета, который добавляется в пластичные смазочные материалы.

Трибологические испытания проводились на модернизированной машине трения СМТ-1 при контакте пластины из стали 30X13, закрепленной в нагрузочном рычаге, с роликом \varnothing 40 мм из стали Ст. 45, установленном на ведущем валу СМТ-1 (рис. 1, а). Испытания проводились по схеме «вал – вкладыш», где вал – ролик, вкладыш – пластина (рис. 1, б).

В соответствии с матрицей ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для каждого цикла испытаний выбиралась постоянная нагрузка в зоне контакта $F = 300; 500$ и 700 Н, при постоянной линейной скорости скольжения 0,1; 0,2 и 0,3 м/с. Длительность испытания составляла 8 ч. Нагрузочно-скоростные режимы были выбраны из соответствия реальным условиям работы трибосопряжения.



а



б

Рис. 1. Узел трибоконтакта машины трения СМТ-1 (а); схема «ролик – пластина» (б)

Наиболее важным параметром покрытий триботехнического назначения является их износостойкость. В нашем случае параметром износостойкости выступает глубина лунки износа. В процессе роста лунки увеличивается фактическая площадь трения. Геометрические размеры износа определялись при помощи цифрового микроскопа Dino-Lite в трёх местах, с последующим вычислением среднего значения (рис. 2). Для контроля ширины l лунки износа осуществлялось размыкание трибопары с периодичностью в 60 мин.

Ширина лунки износа (l) представляет собой основание равнобедренного треугольника, вершиной которого является центр ролика, следовательно, глубина сегмента (h) износа определяется как разность от радиуса ролика и высоты треугольника по основанию по формуле:

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}}, \quad (2)$$

где R – радиус ролика.

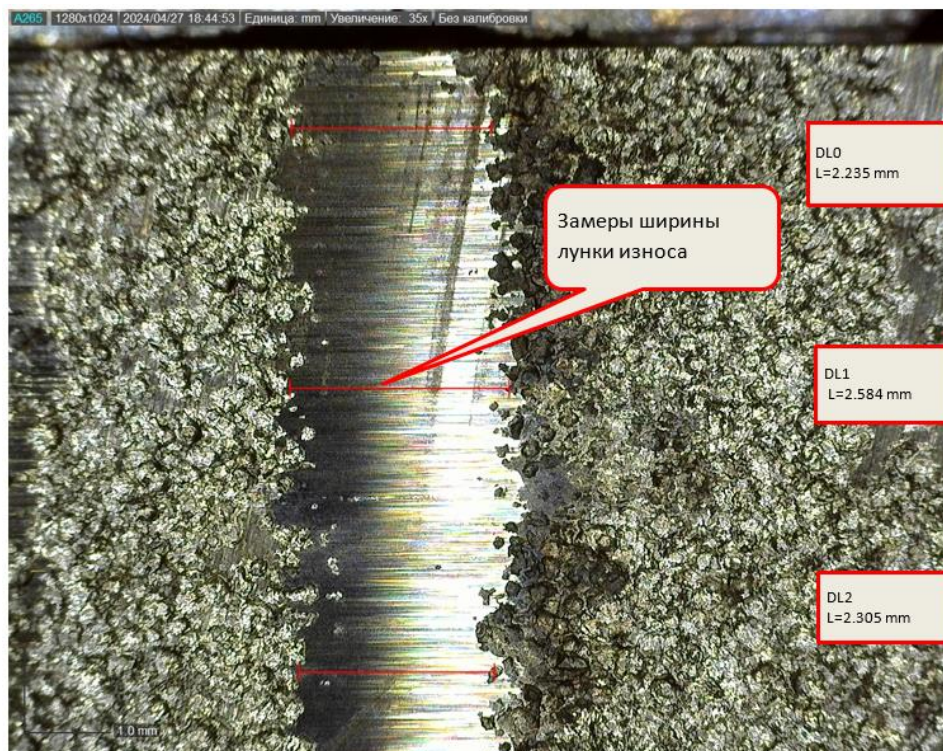


Рис. 2. Износ пластины (увеличение $\times 35x$)

Результаты и их обсуждение

Некоторые результаты трибологических испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты трибологических испытаний

№	Условия проведения испытаний	Ширина лунки износа l , мм	Глубина лунки износа h , мкм
Образец без обработки ЭИЛ и ПУМА-МР без присадки			
11	$N = 600$ Н, $V = 0,1$ м/с	5,94	221,9
ЭИЛ, смазочный материал ПУМА-МР без присадки			
22	ПУМА-МР без присадки, $N = 700$ Н, $V = 0,2$ м/с	0,98	5,97
33	ПУМА-МР без присадки, $N = 700$ Н, $V = 0,3$ м/с	2,0	25,91
ЭИЛ, смазочный материал ПУМА-МР с присадкой			
44	ПУМА-МР + 1 % присадки, $N = 300$ Н, $V = 0,1$ м/с	0,18	2,03
55	ПУМА-МР + 1 % присадки, $N = 700$ Н, $V = 0,3$ м/с	0,74	3,41
66	ПУМА-МР + 3 % присадки, $N = 700$ Н, $V = 0,3$ м/с	0,25	0,39
77	ПУМА-МР + 5 % присадки, $N = 700$ Н, $V = 0,3$ м/с	0,36	0,79

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что при использовании смазочного материала ПУМА-МР без присадки на поверхности, не подвергавшейся модификации, износ имеет существенную тенденцию роста. Следовательно, функционирование типового узла подсистемы «пятник – подпятник» в среде смазочного материала ПУМА-МР без присадки не обеспечивает необходимую долговечность работы. При обработке поверхности пластины методом электроискрового легирования износ фрикционной системы существенно снижается.

При добавлении присадки к смазочному материалу ПУМА-МР в течение первых трёх часов наблюдается процесс приработки – на поверхностях трения формируются вторичные структуры. При дальнейших испытаниях износ пластины стабилизируется и уровень износа существенно снижается.

Оптимизация состава смазочного материала ПУМА-МР методом планирования эксперимента

На первом этапе исследований выполнен анализ влияния эксплуатационных режимов на износостойкость покрытия, нанесённого методом ЭИЛ в случае использования смазочного материала ПУМА-МР без присадки. Исследование проведено с помощью методов планирования эксперимента (ортогональный план второго порядка).

Дисперсии параллельных опытов оказались однородными (критерий Кохрена удовлетворяется). Дисперсия воспроизводимости и средняя квадратичная ошибка эксперимента приведены ниже:

$$\sigma^2 = 16,7; \sigma(h) = 4,1.$$

Анализ матрицы планирования эксперимента позволил построить математическую модель процесса, где в качестве выходного параметра рассмотрена глубина лунки износа, а факторы – рассматриваемые эксплуатационные параметры:

$$I(h) = 207,1 - 0,41N - 760,1V + 0,00049N^2 + 1458,7V^2$$

Полученное уравнение регрессии удовлетворяет критерию Фишера: адекватно при уровне значимости 0,05.

На рис. 3 представлена геометрическая интерпретация полученной математической модели влияния нагрузочно-скоростных условий эксплуатации фрикционной подсистемы «ролик – пластина» на величину износа I , мкм.

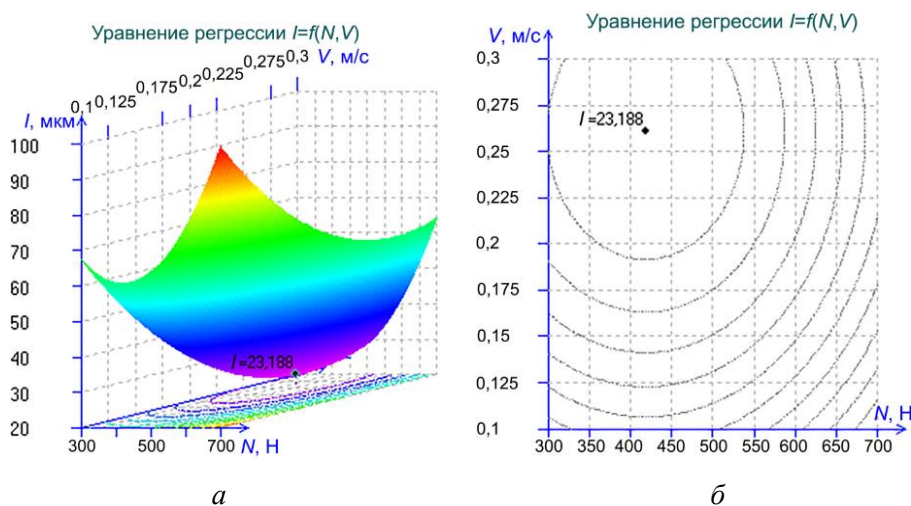


Рис. 3. Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию нагрузки N (а) и скорости V на глубину лунки износа I , мкм (б)

Анализ регрессионной модели показывает, что:

1) исходная фрикционная поверхность пластины (подпятника) не в полной мере обеспечивает износостойкость трибосопряжения, так как при максимальной нагрузке $N = 700$ Н и минимальной скорости скольжения $V = 0,1$ м/с глубина лунки износа максимальна: $I = 99,3$ мкм;

2) в заданной области эксплуатационных параметров минимальная глубина лунки износа $I = 23,2$ мкм наблюдается при нагрузке $N = 418$ Н и скорости относительного скольжения $V = 0,26$ м/с;

3) с увеличением нагрузки N параметр оптимизации I растёт, а с увеличением скорости относительного скольжения V он снижается;

4) по степени влияния нагрузки и скорости на глубину лунки износа большее влияние оказывает скорость.

На втором этапе исследований с целью увеличения ресурса работы трибосопряжения, в рамках комплексной методики совершенствования узла «пятник – подпятник», была выполнена оптимизация процентного содержания присадки двойного метафосфата кальция и цинка к смазочному материалу ПУМА-МР. Рассмотрен трехфакторный эксперимент: в качестве третьего фактора рассматривается процентное содержание присадки к смазочному материалу (уровни варьирования от 1 до 5 %, интервал варьирования 2 %). Составлена матрица планирования трехфакторного эксперимента, приведенная в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования трёхфакторного эксперимента

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_1^2	x_2^2	x_3^2
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
9	+1	-1,22	0	0	0	0	0	+0,75	-0,73	-0,73
10	+1	+1,22	0	0	0	0	0	+0,75	-0,73	-0,73
11	+1	0	-1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,75	-0,73
12	+1	0	+1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,75	-0,73
13	+1	0	0	-1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,75
14	+1	0	0	+1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,75
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73

Выполнен расчёт результатов трёхфакторного эксперимента в соответствии с условиями их проведения по табл. 2. Дисперсии параллельных опытов оказались однородными (критерий Кохрена удовлетворяется).

Дисперсия воспроизводимости и средняя квадратичная ошибка эксперимента приведены ниже:

$$\sigma^2 = 2,6 \cdot 10^{-3}; \quad \sigma(h) = 0,051.$$

Получена регрессионная модель влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных условий эксплуатации рассматриваемого трибосопряжения на величину износа I , мкм.

$$I(h) = 2,1 - 0,48P - 0,0065N + 3,8V + 0,066P^2 + 7,9 \cdot 10^{-6} N^2 - 10V^2.$$

Полученное уравнение регрессии удовлетворяют критерию Фишера: адекватно при уровне значимости 0,05 ($F_p = 1,7$; $F_{кр} = 3,1$).

На рис. 4–6 представлена геометрическая интерпретация полученной математической модели влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных условий эксплуатации фрикционной подсистемы «вал – вкладыш» на величину износа I , мкм.

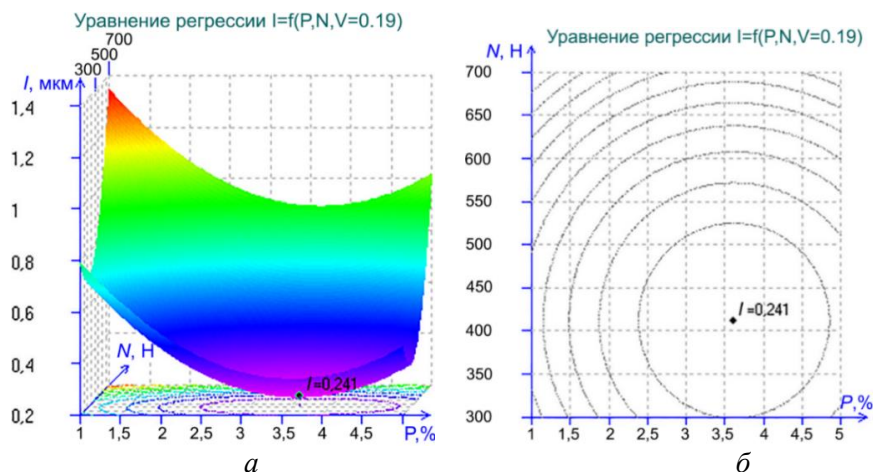


Рис. 4. Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию процентного содержания присадки двойного метафосфата кальция и цинка (x_1) (а) и нагрузки N (x_2) на выходной параметр оптимизации (глубина лунки износа) I , мкм при фиксированной скорости относительного скольжения $V = 0,185$ м/с (x_3) (б)

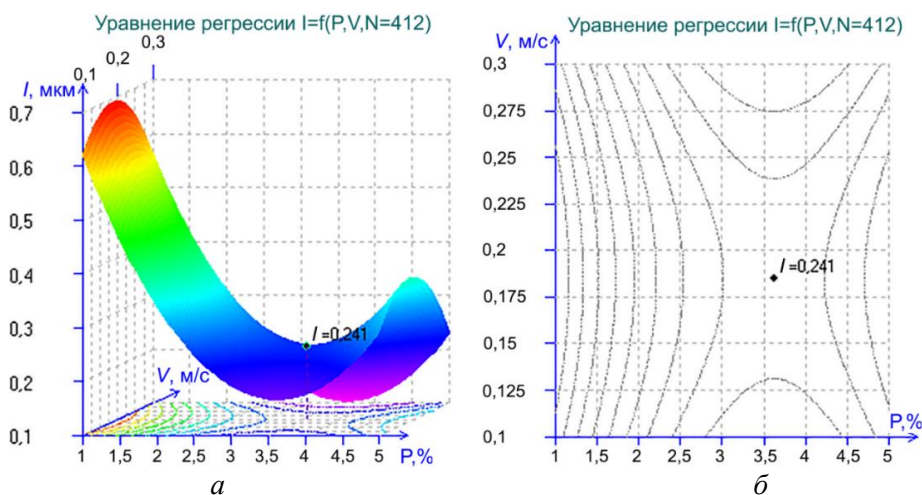


Рис. 5. Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию процентного содержания присадки двойного метафосфата кальция и цинка (x_1) (а) и скорости относительного скольжения V (x_3) на выходной параметр оптимизации (глубина лунки износа) I , мкм при фиксированной нагрузке $N = 411,8$ Н (x_2) (б)

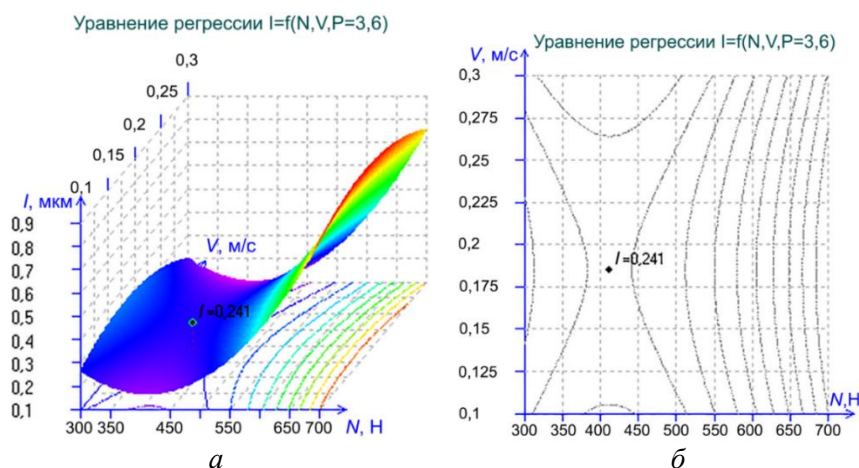


Рис. 6. Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию нагрузки N (x_2) (а) и скорости относительного скольжения V (x_3) на глубину лунки износа I , мкм при фиксированном процентном содержании присадки двойного метафосфата кальция и цинка $P = 3,6$ % (x_1) в смазочном материале ПУМА-МР (б)

Анализ регрессионной модели показывает, что:

1) в заданной области эксплуатационных параметров минимальная глубина лунки износа $I = 0,241$ мкм наблюдается при нагрузке $N = 411,8$ Н, максимальной скорости относительного скольжения $V = 0,185$ м/с и процентном содержании присадки двойного метафосфата кальция и цинка $P = 3,6$ % в смазочном материале ПУМА-МР;

2) в заданной области эксплуатационных параметров максимальная глубина лунки износа $I = 1,4$ мкм наблюдается при нагрузке $N = 700$ Н, скорости относительного скольжения $V = 0,185$ м/с и минимальном процентном количестве присадки двойного метафосфата кальция и цинка $P = 1$ % в смазочном материале ПУМА-МР;

3) с увеличением нагрузки N параметр оптимизации I растёт, с увеличением скорости относительного скольжения V параметр оптимизации I снижается, с увеличением процентного содержания присадки двойного метафосфата кальция и цинка в смазочном материале ПУМА-МР параметр оптимизации I также снижается;

4) по степени влияния нагрузки и скорости на глубину лунки износа большее влияние оказывает нагрузка;

5) на точку экстремума глубины лунки износа большее влияние оказывает нагрузка N .

Заключение

Анализ проведенных исследований показывает эффективность предлагаемой комплексной методики совершенствования узла «пятник – подпятник». Обработка методом электроискрового легирования в индустриальном масле И-40 вольфрамовым электродом FUBAG серии WP, с одной стороны, эффективно предохраняет поверхность стали и электрода от окисления в процессе ЭИЛ, что исключает коррозию в условиях эксплуатации, с другой стороны, нанесенное покрытие обладает определенным уровнем шероховатости, что создает условия создания «микрорезервуаров», обеспечивающих сохранение смазочного материала в процессе эксплуатации. При этом использование присадки двойного метафосфата кальция и цинка в смазочном материале ПУМА-МР обеспечивает образование вторичных структур, прочно удерживающихся на поверхности трения. Последний факт подтверждается проведенным исследованием влияния эксплуатационных режимов на износостойкость покрытия, нанесенного методом ЭИЛ, в случае использования смазочного материала ПУМА-МР без присадки.

Оптимизация содержания присадки к смазочному материалу позволила существенно увеличить ресурс работы исследуемой фрикционной системы. Результаты трибологических исследований позволяют прогнозировать, что предложенный в работе подход может быть успешно использован в реальном узле подсистемы «пятник – подпятник».

Список литературы

- 1 Дульский, Е. Ю. Анализ проблемы износа в зоне контакта «пятник – подпятник» грузового подвижного состава и пути ее минимизации / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. В. Ромашов, С. В. Трескин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 1 (77). – С. 116–126. – DOI 10.26731/1813-9108.
- 2 Патент 49782 Российская Федерация. Пятник грузового вагона / С. И. Попов, В. М. Круглов, А. В. Осинцев [и др.]. – № 2005116540/22 ; заявл. 30.05.2005 ; опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34. – 1 с.
- 3 Патент 2613113 Российская Федерация. Пятник железнодорожного подвижного состава / Р. А. Савушкин, К. В. Кякк, А. С. Кононенко [и др.]. – № 2015156658 ; заявл. 29.12.2015 ; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 8. – 7 с.

References

- 1 Dulsky, E. Yu. Analysis of the problem of wear in the contact zone «center plate – thrust bearing» of freight rolling stock and ways to minimize it / E. Y. Dulsky, P. Y. Ivanov, A. V. Romashov, S. V. Treskin ; Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2023. – No. 1 (77). – P. 116–126. – DOI 10.26731/1813-9108.
- 2 Patent 49782 Russian Federation. Center plate of a freight car / S. I. Popov, V. M. Kruglov, A. V. Osintsev [et al.]. – No. 2005116540/22 ; declared 30.05.2005 ; publ. 10.12.2005, Bul. No. 34. – 1 p.
- 3 Patent 2613113 Russian Federation. Center plate of the railway rolling stock / R. A. Savushkin, K. V. Kyakk, A. S. Kononenko [et al.]. – No. 2015156658 ; declared 12/29/2015 ; publ. 03/15/2017, Bul. No. 8. – 7 p.

4 А.с. 1595724 СССР. Пятниковый узел рельсового транспортного средства / В. А. Юдин, М. М. Болотин, П. А. Устич [и др.]. – № 4615849 ; заявл. 05.12.1988 ; опубл. 30.09.1990, Бюл. № 36. – 2 с.

5 Патент 2228276 Российская Федерация. Пятниковый узел рельсового транспортного средства / В. А. Трунов. – № 2001133492/11 ; заявл. 07.12.2001 ; опубл. 10.05.2004, Бюл. № 13. – 4 с.

6 Патент 2279368 Российская Федерация. Пятниковый узел опоры кузова на тележку грузового вагона / А. И. Кокорев, В. В. Березин, А. А. Лунин. – № 2004138580/11 ; заявл. 29.12.2004 ; опубл. 10.07.2006, Бюл. № 19. – 7 с.

7 Патент 2465161 Российская Федерация. Пятниковый узел опоры кузова на тележку грузового вагона / В. А. Чаркин, В. В. Березин, Ю. А. Панин [и др.]. – № 2011123682/11 ; заявл. 14.06.2011 ; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30. – 7 с.

8 Патент 2574548 Российская Федерация. Способ нанесения антифрикционных покрытий на упорные поверхности пятникового узла / В. И. Колесников, А. П. Сычев, А. В. Лапицкий [и др.]. – № 2014146880/02 ; заявл. 21.11.2014 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. – 5 с.

9 Трибологические испытания стальных образцов с модифицированной поверхностью методом электроискрового легирования в различных средах / И. В. Колесников, В. В. Авилов, М. В. Бойко, А. И. Воропаев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2022. – № 36. – С. 32–35. – ISSN 2310-9351.

10 Исследование влияния межэлектродной среды на результаты обработки стальной поверхности методом электроискрового легирования / А. В. Сидашов, П. Г. Иваночкин, С. А. Данильченко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 59–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_59.

11 Эффективная полимерная фосфоромолибдатная присадка для смазочных материалов / М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 175–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

4 A.S. 1595724 USSR. Center plate arrangement of a rail vehicle / V. A. Yudin, M. M. Bolotin, P. A. Ustych [et al.]. – No. 4615849 ; declared 05.12.1988 ; publ. 30.09.1990, Bul. No. 36. – 2 p.

5 Patent 2228276 Russian Federation. Center plate arrangement of a rail vehicle / V. A. Trunov. – No. 2001133492/11 ; declared 07.12.2001 ; publ. 10.05.2004, Bul. No. 13. – 4 p.

6 Patent 2279368 Russian Federation. Center plate of a body support on the freight-car truck / A. I. Kokorev, V. V. Berezin, A. A. Lunin. – No. 2004138580/11 ; declared application dated 12/29/2004 ; publ. 10.07.2006, Bul. No. 19. – 7 p.

7 Patent 2465161 Russian Federation. Center plate of a body support on the freight-car truck / V. A. Charkin, V. V. Berezin, Yu. A. Panin [et al.]. – No. 2011/123682/11 ; declared 06/14/2011 ; publ. 10/27/2012, Bul. No. 30. – 7 p.

8 Patent 2574548 Russian Federation. The method of applying antifriction coatings to the thrust surfaces of the center plate arrangement / V. I. Kolesnikov, A. P. Sychev, A. V. Lapitsky [et al.]. – No. 2014146880/02 ; declared 21.11.2014 ; publ. 10.02.2016, Bul. No. 4. – 5 p.

9 Tribological testing of steel samples with a modified surface by the method of electric spark alloying in various media / I. V. Kolesnikov V.V. Avilov, M. V. Boyko, A. I. Voropaev // New materials and technologies in mechanical engineering. – 2022. – No. 36. – P. 32–35. – ISSN 2310-9351.

10 Investigation of the effect of the interelectrode medium on the results of processing the steel surface by the method of electric spark alloying / A. V. Sidashov, P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4. – P. 59–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_59.

11 An effective polymer phosphoromolybdate additive for lubricants / M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 175–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

V. V. Avilov

ASSESSMENT OF THE COMPLEX EFFECT OF ELECTRIC SPARK TREATMENT OF THE FRICTION SURFACE AND THE USE OF GREASE LUBRICANTS WITH EFFECTIVE ADDITIVES ON THE WEAR RESISTANCE OF HEAVILY LOADED TRIBOSYSTEMS

Abstract. The study proposes a comprehensive methodology for improving the “center plate – thrust bearing” node, including the treatment of the surface of the thrust bearing by the

method of electric spark alloying in I-40 industrial oil with a FUBAG tungsten electrode and the use of plastic lubricants containing effective additives that promote the formation of secondary structures on a metal counterbody. Tribological tests were carried out on a friction machine with 30X13 steel samples after processing by the method of electric spark alloying in the presence of PUMA-MR lubricant. A double calcium and zinc metaphosphate is used as an additive. Using experimental planning methods, the effect of the additive percentage and load-speed conditions on the wear rate was investigated. Optimization of the lubricant additive content made it possible to significantly increase the service life of the friction system under study.

Keywords: wear resistance, surface modification, electric spark alloying, lubricants, tribology.

For citation: Avilov, V. V. Assessment of the complex effect of electric spark treatment of the friction surface and the use of greases with effective additives on the wear resistance of heavily loaded tribosystems / V. V. Avilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 3. – P. 8–16. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_8.

Сведения об авторах

Авилов Виктор Владимирович
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
младший научный сотрудник,
e-mail: avilov_victor@mail.ru

Information about the authors

Avilov Viktor Vladimirovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Junior Research Assistant,
e-mail: avilov_victor@mail.ru

А. И. Воропаев

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСИСТЕМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ CrSiAlN + DLC ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ АЗОТОМ *

Аннотация. Рассмотрена задача определения физико-механических и трибологических параметров ионно-плазменных покрытий DLC, нанесенных на стальную подложку с использованием азота для стабилизации структуры и толщины покрытий. Полученные зависимости коэффициента трения μ и длины пробега L образцов до момента разрушения покрытия от тока и индукционных катушек (λ , A) – мощности ионного потока, количества стабилизатора – азота (%N) позволили не только оптимизировать режимы нанесения покрытия, но и выявить недостатки DLC-покрытий. В частности, установлено, что коэффициент трения практически остается постоянным и достаточно малым во всем диапазоне нагрузок на уровне $\mu = 0,17$. Что касается износа, то в интервале значительных нагрузок экспериментальная зависимость пути трения до разрушения непрерывно убывает и стремится к нулю. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на разработку технологии получения комбинированного покрытия путем чередования металло-керамических слоев CrAlSiN, полученных дуговым напылением путем физического вакуумного осаждения PVD-покрытий, и углеродных (в том числе алмазоподобных) слоев, полученных лазерным испарением графита, без извлечения образцов-подложек из вакуумной камеры установки BRV-600. В результате совмещения высокой износостойкости нитридного покрытия CrAlSiN и низкого коэффициента трения покрытия DLC существенно увеличивает износостойкость высоконагруженных трибосопряжений.

Ключевые слова: вакуумная ионно-плазменная технология, нитридные и алмазоподобные покрытия, механические и трибологические свойства покрытий, параметры нанесения покрытий, комбинированные покрытия.

Для цитирования: Воропаев, А. И. Повышение износостойкости тяжело нагруженных трибосистем путем применения комбинированных ионно-плазменных алмазоподобных покрытий CrSiAlN + DLC при стабилизации азотом / А. И. Воропаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 17–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_17.

Введение и постановка задачи

Углеродные материалы, в том числе полученные в виде покрытий, в настоящее время представляют большой научный интерес. Несмотря на их широкое исследование и внедрение этого класса материалов, известных в настоящее время, таких, как алмаз (в том числе ультрадисперсные (нано-) алмазы и алмазоподобный углерод), графит, графен, графан, фуллерен, карбонадо, карбин, кубан, углеродные нанотрубки, проблема выбора технологий для их практического получения и использования в широком диапазоне нагрузок, скоростей и сравнительной их работоспособности остается открытой, по мнению авторов работ [1, 2].

Из анализа работ [3, 4] следует, что понятие алмазоподобных покрытий (DLC) предусматривает различные типы углеродных материалов в PVD-покрытиях и при этом DLC состоит из sp^2 - и sp^3 -углеродных электронных структур. Структура с sp^3 -связями увеличивает твердость покрытия, приближая DLC к алмазу, а гибридизация sp^2 -углеродных структур представляет аморфные образования из графитоподобных кластеров с sp^2 -связями. В качестве различных вариантов алмазоподобного углерода обычно рассматривают аморфный углерод (обозначается как а-С), тетраэдрический аморфный или просто тетрааморфный углерод (одно из самых твердых покрытий семейства DLC, обозначается та-С или та-DLC), гидрогенизированный аморфный углерод (обозначается как а-С:Н), который по умолчанию принимается в качестве DLC, а также аморфный углерод, легированный металлами, чаще всего W, Ti, Cr (обозначается а-С:Н:Me или Me-DLC).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30007).

С этой точки зрения интересны сравнительные данные различных типов покрытий DLC, приведенных в работе [5]. Твердость покрытия а-С:Н:W составляет $H = 1000 \dots 1500$ HV, а коэффициент сухого трения по стали $\mu \approx 0,1$. При этом покрытие показывает высокую прирабатываемость: поверхность с покрытием сглаживается, в то же время заполняя неровности поверхности у ответной детали (контртела), т.е. достаточно нанести покрытие на одну поверхность, чтобы обеспечить защиту от износа обеих деталей для значительного снижения трения. Эффект прирабатываемости достигается благодаря относительно невысокой твердости покрытия а-С:Н:W. Твердость покрытия а-С:Н уже доходит до $H = 2500$ HV, а коэффициент сухого трения по стали тот же: $\mu \approx 0,1$. Результаты трибологических испытаний показали, что более высокая твердость покрытия а-С:Н по сравнению с покрытием а-С:Н:W обеспечивает больший ресурс износостойкости, но в то же время требует и более длительного периода приработки.

Заслуживают внимания трибологические аспекты двух классов покрытий семейства DLC, достаточно активно изучаемые в научных публикациях: углеродные покрытия DLC, легированные металлами (т.е. покрытия класса а-С:Н:Me или DLC-Me); комбинированные покрытия класса MeC(MeN)/а-С:Н с чередующимися карбидными (нитридными) и углеродными слоями.

Легированные титаном (в количестве от 10 до 20 ат.%) алмазоподобные покрытия (DLC-Ti) исследованы в работе [6]. Покрытия получали магнетронным распылением титановой мишени на постоянном токе в газовой смеси ($\text{CH}_4 + \text{Ar}$), изучали их механические и трибологические свойства. Показано, что такие покрытия имеют невысокую твердость 13...15 ГПа и коэффициент трения на уровне 0,12...0,15, обладают «эластичностью» и хорошей адгезией. Важным, на наш взгляд, результатом этой работы является то, что полученная ее авторами экспериментальная зависимость микротвердости H и внутренних напряжений от напряжения смещения на подложке $U_{\text{см}}$ является нелинейной: с ростом $U_{\text{см}}$ функция $H = f(U_{\text{см}})$ сначала возрастает в интервале $U_{\text{см}} = 0 \dots -100$ В, а затем убывает в интервале $U_{\text{см}} = -100 \dots -200$ В. Внутренние напряжения в зависимости от напряжения смещения изменяются аналогично функции $H = f(U_{\text{см}})$ – за счет роста температуры субстрата. Эта зависимость показывает, что такие технологические параметры, как, в частности, напряжение смещения, непосредственно влияют на свойства покрытия, причем это влияние является нелинейным, а, следовательно, может и должно быть оптимизировано.

Покрытия DLC, *легированные хромом* (DLC-Cr), исследованы в работе [7], *вольфрамом* (DLC-W) – [8], *бором* (DLC-B) – [9], комплексами *титана с вольфрамом* (DLC-Ti/W) – [10] и *вольфрама с молибденом и кремнием* (DLC-W/Mo/Si) – [11]. Все авторы этих работ сходятся в том, что износостойкость исследованных покрытий определяется состоянием контактного трибослоя, образующегося в процессе трения на поверхности DLC и состоящего из сложных комплексов, включающих углерод, Me-C и Me-O. Также большое значение в подобных покрытиях, не содержащих водород и состоящих из частиц соединения Me-C в углеродной DLC-матрице (типа 3D-композитов), имеет состояние матрицы, определяемое в первую очередь соотношением электронных конфигураций углерода sp^3/sp^2 . Это соотношение должно отвечать условиям трения так, чтобы не происходило выкрашивание твердых частиц карбидов Me-C из покрытия, которые в этом случае превращаются в абразив на контактной поверхности и интенсифицируют износ.

Комбинированные покрытия класса MeC(MeN)/а-С:Н с чередующимися карбидными (нитридными) и углеродными слоями получили развитие только в последние годы, что, по-видимому, обусловлено технологическими сложностями нанесения таких покрытий. Для их получения используют либо дуговое многокатодное ионно-плазменное оборудование, либо совмещение нескольких технологических комплексов (например, катодное и магнетронное испарение), либо раздельное нанесение слоев покрытия различными технологическими способами. В любом случае формирование комбинированных покрытий на базе DLC требует больших затрат времени и ресурсов, чем получение других видов покрытий семейства DLC. Поэтому результаты исследования комбинированных покрытий в научной литературе встречаются значительно реже, чем, например, результаты рассмотренных выше покрытий класса а-С:Н:Me или DLC-Me.

В работах [12, 13] показано, что износостойкость *композитного покрытия* TiAlN/DLC-Ti выше, чем покрытия DLC-Ti, более чем в два раза (исходя из ширины дорожек износа 73,2 и 169,8 мкм соответственно), хотя значения коэффициента трения для обоих покрытий были одинаковы $\text{CoF} = 0,1$. Оба покрытия наносились на подложку из быстрорежущей стали W18Cr4V (P18Ф) с подслоем Ti; трибологические испытания проводились в одинаковых экспериментальных условиях. Кроме того, отмечается высокая адгезия между слоями композита TiAlN и DLC-Ti, а также существенное влияние напряжения смещения $U_{\text{см}}$ на его свойства: с ростом $U_{\text{см}}$ увеличивается доля sp^3 -связей в слое DLC, что приводит к

возрастанию твердости слоя с 14 до 24 ГПа, а модуля упругости – с 190 до 230 ГПа. Соответственно возрастает и износостойкость комбинированного покрытия в целом. При этом адгезия границ раздела между слоями TiAlN и DLC-Ti, а также между слоем TiAlN и стальной подложкой уменьшалась с увеличением $U_{см}$. Прикладной аспект использования аналогичных комбинированных покрытий системы TiAlN/DLC представлен в работе [14], где показано, что нанесение покрытия на поверхности штампа для формования листового металла улучшает износостойкость даже при высоких температурах и высоких контактных давлениях как в условиях сухого трения, так и при использовании смазывания маслом.

Кроме того, при напылении углеродных покрытий по вакуумной ионно-плазменной технологии возникает еще одна проблема, связанная с безопасностью технологического процесса. Как уже отмечалось в работах [5, 15], для снижения трещинообразования в покрытиях DLC применяется модифицирование углеродных структур водородом. Этот метод особенно актуален для покрытий семейства DLC с максимальным уровнем твердости та-С. В практике вакуумного ионно-плазменного напыления для модификации таких покрытий водородом в качестве реакционного газа применяется ацетилен. Вследствие этого процесс приобретает повышенную пожаро- и взрывоопасность. В работе [16] показано, что с целью исключения рисков подобного характера следует использовать азот вместо ацетилена. В этом случае стабилизация покрытия осуществляется растворенными атомами азота. Этот возможный путь пока еще недостаточно исследован и слабо апробирован. В научной литературе, посвященной алмазоподобным покрытиям, он затронут фрагментарно, что делает изучение данного научного направления весьма актуальным.

Таким образом, прогнозируемое управление процессом получения вакуумных ионно-плазменных покрытий представляет собой серьезную проблему в современной инженерии поверхности, связанную с большим количеством факторов различной природы, определяющих работоспособность покрытия. Одним из путей решения этой проблемы является установление универсальных зависимостей (хотя бы эмпирического характера) между группой вариативных технологических параметров и свойствами покрытия, которые помогут сократить общее число управляющих параметров и снизить влияние флуктуационного фактора в технологии нанесения покрытий.

Однако, несмотря на большое количество работ, единой концепции универсального применения покрытий до настоящего времени нет. Каждый из исследователей разрабатывает покрытия в соответствии с запросами трибологических характеристик узлов трения. Поэтому в отношении покрытий одной из центральных задач являются вопросы стабилизации покрытий на основе углерода. Это обусловлено тем, что углеродные покрытия при нанесении различными технологическими способами склонны к аморфизации и наноструктурированию. Эта особенность делает актуальной проблему стабилизации азотом алмазоподобных покрытий.

Таким образом, анализ современного состояния в области получения покрытий с использованием методов модификации показывает, что использование PVD-покрытий в тяжело нагруженных трибосопряжениях позволит повысить их надежность и износостойкость. При этом весьма перспективной является ионная имплантация поверхности подложки перед нанесением гетерогенных функциональных покрытий с определенным соотношением графита с атомной конфигурацией sp^2 и алмаза sp^3 , что обеспечивает структурную приспособляемость к условиям эксплуатации трибосистемы [17].

Материалы и методы исследования

В качестве подложек в работе использованы полированные (не ниже 10-го класса чистоты с $R_a \leq 0,12$ мкм и $R_z \leq 0,6$ мкм по ГОСТ 2789-73) пластинчатые образцы с размерами 50×30×5 мм из широко распространенной в машиностроении конструкционной низколегированной улучшаемой стали 40ХН2МА [18].

Для выполнения программы нанесения углеродных и комбинированных покрытий была использована установка BRV-600, предназначенная для формирования многослойных, многокомпонентных, многофазных вакуумных ионно-плазменных покрытий различной природы методом PVD. Установка разработана и смоделирована научным коллективом РГУПС, после чего произведена в Республике Беларусь (производитель ООО «БелРосВак», г. Минск).

Технологический процесс нанесения углеродных и комбинированных покрытий заключается в проведении следующих операций:

- 1 Очистка образцов электроимпульсным полированием в водном растворе солей аммония низкой концентрации (3...6 %) в течение 8 мин.
- 2 Ультразвуковая обработка образцов в течение 15 мин.
- 3 Сушка образцов в сушильном шкафу в течение 10 мин.

4 Контроль изделий после очистки с помощью лупы или бинокулярного микроскопа. На поверхности подготовленных изделий не должно быть жировых пятен, заусенцев, царапин.

5 Монтаж образцов на оснастку и загрузка в камеру.

6 Закрепление оснастки с образцами в камере вакуумной установки на вращающейся платформе (столе) планетарного типа.

7 Откачка камеры через байпасный клапан при помощи форвакуумного насоса до давления $2 \cdot 10^{-2}$ Па.

8 Откачка камеры турбомолекулярным насосом с перекрытием форвакуумного клапана до давления $5 \cdot 10^{-4}$ Па.

9 Включение привода вращения платформы (стола) планетарного типа и разгон до скорости 6 об/мин.

10 Включение блока нагревателей типа ТЭН и программирование нагрева образцов в камере до температур: 450 °С при напылении металлических или металлокерамических покрытий; 250 °С при напылении углеродных покрытий.

11 Активация (очистка) поверхности образцов в течение 5...15 мин с помощью ионного источника АИДА ионами Ar (значение регулятора расхода газа (РРГ Ar) – 50 %, парциальное давление Ar – 4,2...5,4 Па) при давлении в камере ~0,7 Па, температуре ~400 °С и при включенном блоке смещения опорного напряжения (BIOS) с параметрами: напряжение 1000 В; ток 2000 мА; мощность 5000 Вт.

12 Выполнение ионного осаждения подслоя вакуумным электродуговым разрядом с катода Ti для получения подслоя из чистого титана, а также испарением с двух катодов (чистого Cr и силумина системы Al-Si) при осаждении износостойкого слоя CrAlSiN комбинированных покрытий.

13 Выполнение ионного осаждения из паровой фазы углеродных покрытий класса DLC методом импульсно-дугового испарения с инициализацией (поджигом) дугового разряда через лазерную систему. В процессе ионного осаждения углеродных покрытий из паровой фазы в системе газонапуска расходомер регулирует давление азота, используемого для стабилизации покрытий DLC.

В процессе обработки рабочих режимов установки BRV-600 в качестве *фиксированных параметров* стадии нанесения покрытия были приняты характеристики импульсно-дугового испарителя углеродного блока установки, которые оставались неизменными в ходе всех выполненных экспериментальных работ [18]: напряжение разрядника 300 В; частота лазера 10 Гц; энергия лазерного излучения 600...700 мДж; использование цилиндрического катода из порошкового графита ВП-6.

В качестве *варьируемых параметров* были приняты характеристики: давление в рабочей камере $P = 0,011 \dots 0,31$ Па; ток индукционных катушек $\lambda = 1 \dots 5$ А; величина подачи азота в камеру $\%N = 1 \dots 20$; время нанесения покрытия $t = 10 \dots 35$ мин.

Аттестация микроструктуры нанесенных покрытий проводилась методами оптической металлографии, сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Исследование физико-механических свойств проводилось на измерительной платформе Nano-Test 600 по ГОСТ 8.748-2011 (ISO 14577-1: 2002); измеряемые характеристики: твердость H , модуль упругости E , индекс упругости H/E и индекс пластичности H^3/E^2 .

Измерение трибологических характеристик: коэффициента трения μ , длины пути L , пройденного образцом до разрушения покрытия, объемного износа J ($\text{мм}^3/\text{Нм}$) в расчете на нагрузку F и длину пути L – проводилось на машине трения TRB (Anton Paar Tritec) по методике испытаний: DIN 50324-1992 и ASTM G99-2017; схеме испытаний «штифт – пластина»; тип движения – возвратно-поступательное и круговое со скоростью трения 0,2 м/с; контртело (штифт) – шарик из кермета WC-Co; нагрузка трения $F = 1,0 \dots 10,0$ Н [19].

Результаты исследования и их обсуждение

В результате статистической обработки получены зависимости твердости и модуля упругости от величины подачи азота в камеру $\%N$, тока катушек λ , характеризующего объемную плотность мощности ионного потока осаждаемого углерода и давления в камере (рис. 1, 2). График зависимости $H = f(\%N)$ четко определяет интервал оптимальных значений параметра $\%N$, который составляет $N = 5 \dots 8$ %, и такое характерное нарушение линейности этой зависимости объясняется тем, что азотная стабилизация углеродного покрытия оказывает сильное и нелинейное влияние на твердость H покрытия. Что касается времени напыления t , то имеем прямо пропорциональное линейное влияние на толщину покрытия, а на твердость H покрытия время напыления не влияет.

Поскольку ток катушек соленоидов λ определяет объемную плотность мощности ионного потока осаждаемого углерода, значения λ не могут быть слишком малыми или слишком большими. При

малых значениях λ покрытие либо формируется неплотным, либо осаждается слишком медленно. При больших λ происходит ионное травление подложки [18].

Что касается зависимости твердости H от давления в камере P , то она практически линейно возрастает по мере улучшения вакуума, что соответствует физическому смыслу вакуумного ионно-плазменного напыления: чем меньше давление в рабочей камере, тем меньше помех для ионного потока в процессе осаждения покрытия.

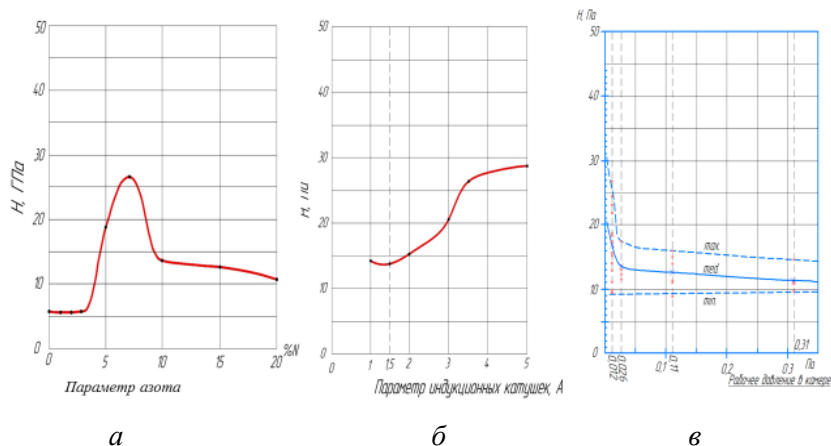


Рис. 1. Экспериментальные зависимости изменения твердости H углеродных покрытий DLC от параметров нанесения:

a – величины подачи азота в камеру %N; $б$ – тока катушек соленоидов λ (A);
 $в$ – давления P (Па) в рабочей камере

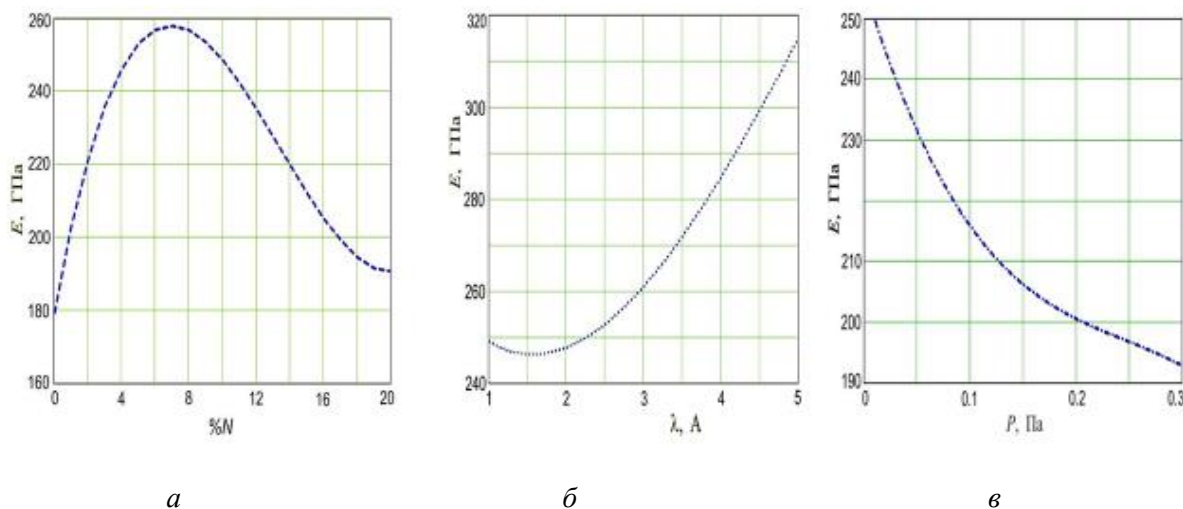


Рис. 2. Зависимости изменения модуля упругости углеродных покрытий от параметров нанесения:

a – величины подачи азота в камеру %N; $б$ – тока катушек соленоидов λ (A);
 $в$ – давления P (Па) в рабочей камере

Расчет параметров сопротивления упругости H/E и пластичности H^3/E^2 представлен на рис. 3 в зависимости от величины подачи азота в камеру %N (a); тока катушек соленоидов λ (A) ($б$); рабочего давления в камере P (Па) ($в$).

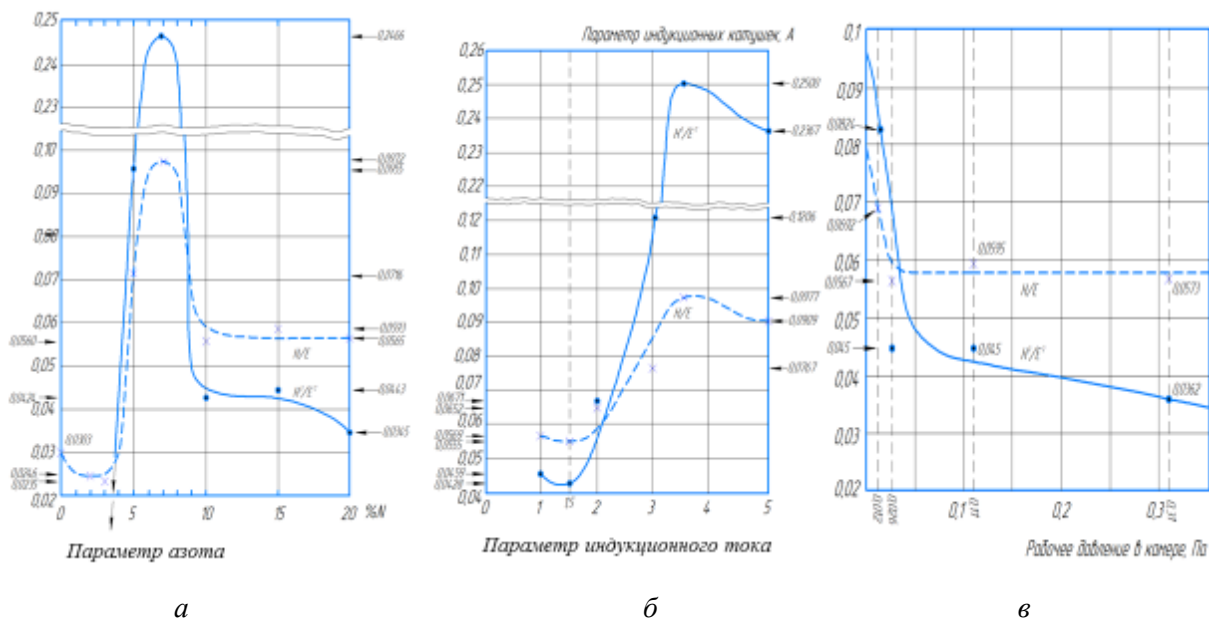


Рис. 3. Зависимости отношений H/E и H^3/E^2 от величины подачи азота в камеру %N (а); тока катушек соленоидов λ (А) (б); рабочего давления в камере P (Па) (в)

Экспериментальные результаты (см. рис. 1–3), полученные на основе анализа и статистической обработки базы данных, демонстрируют следующие тенденции:

1) характер зависимостей как у H , так и у E от каждого из вариативных параметров %N, P и λ совершенно различный;

2) каждый параметр %N, P и λ изменяет H и E схожим образом, т.е. качественно зависимости, например, $H = f(\%N)$ и $E = f(\%N)$ практически идентичны.

Первая из этих тенденций свидетельствует о том, что, поскольку три рассмотренных вариативных параметра действуют на физико-механические свойства разнонаправлено, режим нанесения углеродных покрытий по этим параметрам может быть (и должен быть) оптимизирован. Вторая тенденция говорит о том, что влияние параметров %N, P и λ на прочностные свойства покрытий (H и E) не является стохастическим, а основано на единых явлениях и процессах [18].

На основе полученных однопараметрических зависимостей несложно выделить область значений технологических параметров %N, P и λ , в пределах которой на использованном в работе оборудовании с высокой степенью достоверности будет обеспечен стабильный уровень физико-механических характеристик покрытий DLC, определяемых методами непрерывного индентирования:

– область оптимальных значений варьируемых технологических параметров:

$$\%N = 5 \dots 8; \lambda = 3,0 \dots 3,8 \text{ А};$$

– прогнозируемые физико-механические свойства углеродных DLC-покрытий:

$$H \geq 18 \dots 20 \text{ ГПа}; E \geq 250 \text{ ГПа}; H/E \geq 0,07; H^3/E^2 \geq 0,08 \text{ ГПа}.$$

Указанный уровень физико-механических свойств покрытий может быть достигнут и за пределами приведенной области оптимальных значений параметров, однако в этом случае, как показывает анализ сформированной базы данных, устойчивая повторяемость значений данных свойств не гарантируется [18].

Для построения и анализа зависимостей трибологических свойств покрытий от технологических параметров их нанесения рассматривались в качестве независимых только параметры %N и λ , как существенно влияющие на физико-механические свойства покрытий.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости коэффициента трения μ от технологических параметров %N и λ при нагрузке $F = 10 \text{ Н}$.

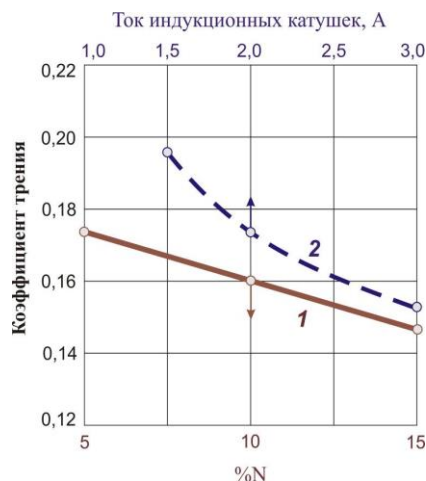


Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициента трения μ от параметров %N (1) и λ (2) для стальных образцов с покрытиями DLC при нагрузке трения $F = 10$ Н

Исследования изменения длины пути L , пройденного образцом до разрушения покрытия DLC и измеряемого в метрах (фактически параметра износа), не выявило устойчивых зависимостей от технологического параметра %N, а зависимость от тока $L = f(\lambda)$ демонстрирует наличие четко выраженного максимума при $\lambda = 1,8 \dots 2,5$ А при любых значениях нагрузки трения F , что позволяет оптимизировать режимы нанесения покрытий по параметру (току) индукционных катушек λ (рис. 5).

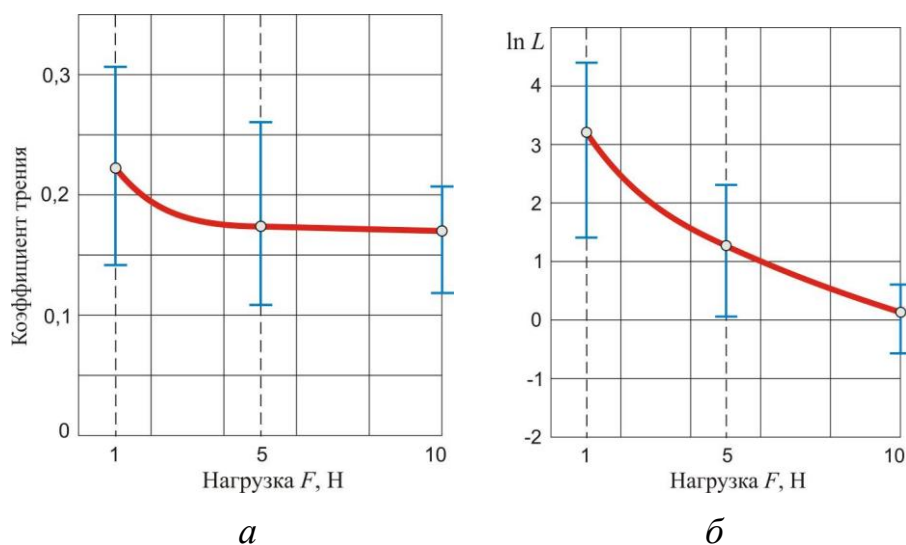


Рис. 5. Экспериментальные зависимости изменения коэффициента трения μ (а) и длины пути L (б), пройденного образцом до разрушения покрытия, от нагрузки F при трибологических испытаниях

Кроме того, экспериментальные зависимости $\ln L = f(\lambda)$ при различных значениях F показывают минимальные значения при больших нагрузках (см. рис. 5), поэтому дальнейшие исследования были направлены на разработку состава и структуры комбинированных покрытий. Комбинированные покрытия представляют собой двухслойную систему CrAlSiN + DLC, сочетающую трибологический углеродный слой DLC (наружный слой с низким коэффициентом трения) и износостойкий внутренний нитридный слой на основе CrAlSiN. Напыление комбинированного покрытия производилось с использованием уникальных возможностей вакуумной установки BRV600, которая позволяет создавать многослойные покрытия путем чередования металлокерамических (или металлических) слоёв, полученных дуговым напылением, и углеродных (в том числе алмазоподобных) слоёв, полученных лазерным испарением графита, без извлечения образцов-подложек из вакуумной камеры [17].

Нитридный слой состава CrAlSiN расположен на стальной подложке. Он формировался при дуговом напылении с двух катодов, один из которых представлял собой технически чистый хром, а второй катод – литой силумин Al–Si. Для лучшей адгезии вначале с хромового катода напылялся подслой Cr,

вслед за которым осаждение велось уже с двух катодов одновременно и с напуском азота в рабочую камеру установки для получения основного нитридного слоя CrAlSiN. В качестве параметров нанесения покрытий CrAlSiN на установке BRV600 были приняты следующие значения: предварительная подготовка поверхности стальной подложки путем ионной имплантации (Ar), продолжительность 15 мин; катодный ток 90 А; давление в рабочей камере 0,024 Па; давление рабочих газов, определяемое по регулятору расхода газов (РРГ): %Ar – 5, %N – 14; скорость осаждения слоя 18 нм/мин; напряжение смещения 120 В; температура подложки 450 °С; ток катушек при магнитной сепарации (соленоиды № 4 и 5) 3 А; время нанесения 60 мин.

В результате проведенных трибологических исследований нитридных ионно-плазменных покрытий системы CrAlSiN установлена высокая износостойкость нагруженных трибосопряжений. В связи с этим очевидна целесообразность комбинированного покрытия CrAlSiN + DLC, в котором совмещается высокая износостойкость нитридного слоя CrAlSiN и низкий коэффициент трения слоя DLC, что в результате существенно повысило износостойкость высоконагруженных трибосопряжений с такими комбинированными покрытиями. При этом следует отметить, что технологические возможности вакуумной установки BRV600 позволяют наносить подобные покрытия за один технологический цикл, не перемещая образцы-подложки из вакуумной камеры.

Структурная схема комбинированного покрытия CrAlSiN + DLC представлена на рис. 6, где видна подложка 1, нитридный слой 2 и DLC-покрытие 3.

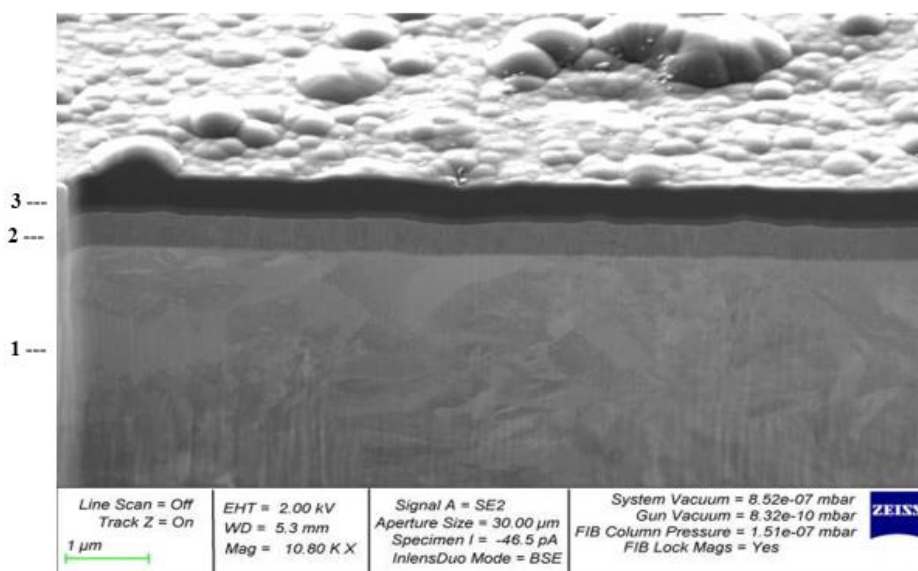


Рис. 6. Структура и толщина комбинированных покрытий CrAlSiN + DLC

Высокую износостойкость комбинированного покрытия, по нашему мнению, можно объяснить ещё и тем, что при трибологических испытаниях на трение скольжения циклическое воздействие штампа-индентора на поверхность покрытия приводит к тому, что покрытие в силу высокого отношения H^3/E^2 не деформируется (не сминается).

Заключение

1 Четырехпараметрический комплекс вариативных технологических параметров нанесения покрытий DLC, включающий величину подачи азота в камеру %N, ток λ индукционных катушек, давление в рабочей камере P и время нанесения t , позволяет обеспечить высокие значения основных физико-механических характеристик покрытия – твердости H и модуля упругости E , сопротивления упругости H/E , сопротивления пластичности H^3/E^2 в пределах:

– прогнозируемых физико-механических свойств углеродных DLC покрытий: $H \geq 18 \dots 20$ ГПа; $E \geq 250$ ГПа; $H/E \geq 0,07$; $H^3/E^2 \geq 0,08$ ГПа;

– области оптимальных значений основных варьируемых технологических параметров: %N = 5...8; $\lambda = 3,0 \dots 3,8$ А.

2 Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что азот, использованный в качестве стабилизатора структуры углеродных покрытий вместо водорода, обеспечивает получение устойчивых значений толщины покрытий DLC вплоть до 1,5...2,0 мкм. При использованных в работе

значениях парциального давления азот не приводил к образованию вторичных нитридных фаз в покрытии, тем не менее интенсивность его напуска в рабочую камеру, определяемая параметром %N, оказывала существенное влияние на физико-механические характеристики покрытия в процессе его нанесения. Поэтому величина %N отнесена к наиболее важным управляющим технологическим параметрам процесса получения вакуумных ионно-плазменных покрытий DLC.

3 С учетом установленных закономерностей показано, что:

– углеродные покрытия, полученные на подложке из стали 40XH2MA по оптимальным режимам нанесения при значениях технологических параметров: %N = $5,5 \pm 0,5\%$ и $\lambda = 2,0 \pm 0,2\lambda$ А, показывают высокую износостойкость и могут быть рекомендованы для прикладного использования в узлах трения;

– при нанесении двухслойных комбинированных покрытий системы CrAlSiN + DLC оптимальные режимы нанесения слоя DLC для получения высокоизносостойких покрытий смещаются к границе наибольших значений интервала параметров %N и λ , используемых для осаждения покрытий DLC с подслоем Ti. Эти комбинированные покрытия могут быть рекомендованы для повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения транспортно-технологических средств.

Список литературы

1 **Азаренков, Н. А.** Наноструктурные покрытия и наноматериалы : Основы получения. Свойства. Области применения. Особенности современного наноструктурного направления в нанотехнологии / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Д. А. Колесников. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 368 с. – ISBN 978-5-397-02385-6.

2 **Savchenko, A.** Transforming Graphene / A. Savchenko // Science. – 2009. – Vol. 323. – P. 589–590. – DOI 10.1126/science.1169246.

3 **Бирюков, В. П.** Лазерные комплексы для упрочнения деталей и точного раскроя листового материала / В. П. Бирюков // Вестник машиностроения. – 2003. – № 2. – С. 31–33. – ISSN 0235-7119.

4 **Hong, S.** Study on mechanical properties after laser forming / S. Hong, Y. Zhenqiang // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 111–117. – DOI 10.1016/j.optlaseng.2008.07.010.

5 **Балдаев, Н.** Алмазоподобные углеродные покрытия DLC. Варианты и применение / Н. Балдаев // Ритм машиностроения. – 2022. – № 4. – С. 38–43.

6 The mechanical and tribological properties of magnetron sputtered Ti–C:H coatings / V. Y. Kulikovskiy, F. Fendrych, L. Jastrabik [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 102. – P. 81–89.

7 **Li, G.** Effect of Cr Atom Plasma Emission Intensity on the Characteristics of Cr-DLC Films Deposited by Pulsed-DC Magnetron Sputtering / Guang Li, Yi Xu, Yuan Xia // Coatings. – 2020. – Vol. 10 (7). – P. 608. – DOI 10.3390/coatings10070608.

8 **Evaristo, M.** Room and High Temperature Tribological Behaviour of W-DLC Coatings Produced by DCMS and Hybrid DCMS-HiPIMS Configuration / M. Evaristo, F. Fernandes, A. Cavaleiro // Coatings.

References

1 **Azarenkov, N. A.** Nanostructured coatings and nanomaterials : Fundamentals of production. Features. Areas of application. Features of the modern nanostructural direction in nanotechnology / N. A. Azarenkov, V. M. Beresnev, A. D. Pogrebnyak, D. A. Kolesnikov – Moscow : Book House "LIBROCOM", 2012. – 368 p. – ISBN 978-5-397-02385-6.

2 **Savchenko, A.** Transforming Graphene / A. Savchenko // Science. – 2009. – Vol. 323. – P. 589–590. – DOI 10.1126/science.1169246.

3 **Biryukov, V. P.** Laser systems for hardening parts and precise cutting of sheet material / V. P. Biryukov // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2003. – No. 2. – P. 31–33. – ISSN 0235-7119.

4 **Hong, S.** Study on mechanical properties after laser forming / S. Hong, Y. Zhenqiang // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 111–117. – DOI 10.1016/j.optlaseng.2008.07.010.

5 **Baldaev, N.** Diamond-like carbon DLC coatings. Options and applications / N. Baldaev // Rhythm of Mechanical Engineering. – 2022. – No. 4. – P. 38–43.

6 The mechanical and tribological properties of magnetron sputtered Ti–C:H coatings / V. Y. Kulikovskiy, F. Fendrych, L. Jastrabik [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 102. – P. 81–89.

7 **Li, G.** Effect of Cr Atom Plasma Emission Intensity on the Characteristics of Cr-DLC Films Deposited by Pulsed-DC Magnetron Sputtering / Guang Li, Yi Xu, Yuan Xia // Coatings. – 2020. – Vol. 10 (7). – P. 608. – DOI 10.3390/coatings10070608.

8 **Evaristo, M.** Room and High Temperature Tribological Behaviour of W-DLC Coatings Produced by DCMS and Hybrid DCMS-HiPIMS Configuration / M. Evaristo, F. Fernandes,

- 2020. – Vol. 10 (4). – 319 p. – DOI 10.3390/coatings10040319.
- 9 A boron-doped diamond like carbon coating with high hardness and low friction coefficient / Ren Zhencheng, Qin Haifeng, Dong Yalin [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 436–437. – Article no. 203031.
- 10 Ti content on the tribological properties of W/Ti-doped diamond-like carbon film lubricating with additives / Zhang Shaojun, Yue Wen, Kang Jiajie [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 430–431. – P. 137–144. – DOI 10.1016/j.wear.2019.05.002.
- 11 **Evaristo, M.** Room and High Temperature Tribological Behaviour of W-DLC Coatings Produced by DCMS and Hybrid DCMS-HiPIMS Configuration / M. Evaristo, F. Fernandes, A. Cavaleiro // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10 (4). – 319 p. – DOI 10.3390/coatings10040319.
- 12 AlTiN layer effect on mechanical properties of Ti-doped diamond-like carbon composite coatings / Pang Xiaolu, Yang Huisheng, Gao Kewei [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519. – P. 5353–5357. – DOI 10.1016/j.tsf.2011.02.040.
- 13 Microstructure and mechanical properties of Ti/AlTiN/Ti-diamondlike carbon composite coatings on steel / Pang Xiaolu, Yang Huisheng, Gao Kewei [et al.] // *Journal of Materials Research*. – 2010. – Vol. 25, No. 11. – P. 2159–2165. – DOI 10.1557/JMR.2010.0281.
- 14 Effects of DLC/TiAlN-coated die on friction and wear in sheet-metal forming under dry and oil-lubricated conditions : Experimental and numerical studies / M. H. Sulaiman, R. N. Farahana, K. Bienk [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 438–439. – Article no. 203040.
- 15 The role of hydrogen on the friction mechanism of diamond-like carbon films / C. Donnet, J. Fontaine, A. Grill, T. le Mogne // *Tribology Letters*. – 2001. – Vol. 9. – P. 137–142. – DOI 10.1023/A:1018800719806.
- 16 Триботехнические свойства покрытий на основе углерода и углерода, легированного азотом, полученных импульсным вакуумно-дуговым методом / М. Г. Ковалева, А. Я. Колпаков, А. И. Поплавский [и др.] // *Трение и износ*. – 2018. – Т. 39. – № 4. – С. 433–437. – ISSN 0202-4977.
- 17 **Новиков, Е. С.** Установление закономерностей изменения структурно-фрикционных свойств тяжело нагруженных металлополимерных и металлических трибосистем и разработка методов повышения их износостойкости : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Новиков Евгений Сергеевич ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2020. – 149 с.
- A. Cavaleiro // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10 (4). – 319 p. – DOI 10.3390/coatings10040319.
- 9 A boron-doped diamond like carbon coating with high hardness and low friction coefficient / Ren Zhencheng, Qin Haifeng, Dong Yalin [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 436–437. – Article no. 203031.
- 10 Ti content on the tribological properties of W/Ti-doped diamond-like carbon film lubricating with additives / Zhang Shaojun, Yue Wen, Kang Jiajie [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 430–431. – P. 137–144. – DOI 10.1016/j.wear.2019.05.002.
- 11 **Evaristo, M.** Room and High Temperature Tribological Behaviour of W-DLC Coatings Produced by DCMS and Hybrid DCMS-HiPIMS Configuration / M. Evaristo, F. Fernandes, A. Cavaleiro // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10 (4). – 319 p. – DOI 10.3390/coatings10040319.
- 12 AlTiN layer effect on mechanical properties of Ti-doped diamond-like carbon composite coatings / Pang Xiaolu, Yang Huisheng, Gao Kewei [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519. – P. 5353–5357. – DOI 10.1016/j.tsf.2011.02.040.
- 13 Microstructure and mechanical properties of Ti/AlTiN/Ti-diamondlike carbon composite coatings on steel / Pang Xiaolu, Yang Huisheng, Gao Kewei [et al.] // *Journal of Materials Research*. – 2010. – Vol. 25, No. 11. – P. 2159–2165. – DOI 10.1557/JMR.2010.0281.
- 14 Effects of DLC/TiAlN-coated die on friction and wear in sheet-metal forming under dry and oil-lubricated conditions : Experimental and numerical studies / M. H. Sulaiman, R. N. Farahana, K. Bienk [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 438–439. – Article no. 203040.
- 15 The role of hydrogen on the friction mechanism of diamond-like carbon films / C. Donnet, J. Fontaine, A. Grill, T. le Mogne // *Tribology Letters*. – 2001. – Vol. 9. – P. 137–142. – DOI 10.1023/A:1018800719806.
- 16 Tribotechnical properties of coatings based on carbon and carbon doped with nitrogen obtained by pulsed vacuum arc method / M. G. Kovaleva, A. Ya. Kolpakov, A. I. Poplavsky [et al.] // *Friction and wear*. – 2018. – Vol. 39. – No. 4. – P. 433–437. – ISSN 0202-4977.
- 17 **Novikov, E. S.** Establishing patterns of changes in the structural and frictional properties of heavily loaded metal polymer and metal tribosystems and developing methods to increase their wear resistance : specialty 05.02.04 “Friction and wear in machines” : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Novikov Evgeny Sergeevich ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2020. – 149 p.

18 Покрyтия DLC, стабилизированные азотом : оптимизация свойств и режимов нанесения с использованием алгоритмов рандомизированных деревьев и нейронных сетей / А. И. Воропаев, В. И. Колесников, О. В. Кудряков [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

19 Структурные аспекты износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий / В. И. Колесников, О. В. Кудряков, И. Ю. Забияка [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 62–77. – DOI 10.24411/1683-805X-2020-11006.

18 Nitrogen-stabilized DLC coatings : optimization of properties and deposition parameters using randomized tree and neural network algorithms / A. I. Voropaev, V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov [et al.] // Physical Mesomechanics. – 2024. – Vol. 27. – No. 2. – P. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

19 Structural aspects of wear resistance of coatings produced by ion vapor deposition / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, I. Yu. Zabiya [et al.] // Physical Mesomechanics. – 2020. – Vol. 23. – No. 1. – P. 62–77. – DOI 10.24411/1683-805X-2020-11006.

A. I. Voropaev

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF HEAVILY LOADED TRIBOSYSTEMS BY USING COMBINED ION-PLASMA DIAMOND-LIKE COATINGS CrSiAlN + DLC WITH NITROGEN STABILIZATION

Abstract. The study considers the problem of determining the physico-mechanical and tribological parameters of ion-plasma DLC coatings applied to a steel substrate using nitrogen to stabilize the structure and thickness of coatings. The obtained dependences of the coefficient of friction μ and the run length L of the samples up to the moment of coating destruction by the current and induction coils (λ , A) – the power of the ion flux, the amount of stabilizer nitrogen (%N) allowed not only to optimize the coating modes, but also to identify the disadvantages of DLC coatings. In particular, it was found that the coefficient of friction remains practically constant and quite small over the entire range of loads at the level of $\mu = 0,17$. As for wear, in the range of significant loads, the experimental dependence of the friction path to destruction continuously decreases and tends to zero. Therefore, further research was aimed at developing a technology for obtaining a combined coating by alternating CrAlSiN metal-ceramic layers obtained by arc spraying by physical vacuum deposition of PVD coatings, and carbon (including diamond-like) layers obtained by laser evaporation of graphite, without extracting substrate samples from the vacuum chamber of the BRV-600 installation. As a result of combining the high wear resistance of the CrAlSiN nitride coating and the low friction coefficient of the DLC coating, the wear resistance of highly loaded tribounits is significantly increased.

Keywords: vacuum ion-plasma technology, nitride and diamond-like coatings, mechanical and tribological properties of coatings, coating parameters, combined coatings.

For citation: Voropaev, A. I. Increasing the wear resistance of heavily loaded tribosystems by using combined ion-plasma diamond-like coatings CrSiAlN + DLC with nitrogen stabilization / A. I. Voropaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 3. – P. 17–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_17.

Сведения об авторах

Воропаев Александр Иванович
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
директор научно-испытательного центра,
НИЦ НТ НИЧ РГУПС,
e-mail : vai_nano@rgups.ru

Information about the authors

Voropaev Alexander Ivanovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Director of the Research and Testing Center,
RTC NT RD RSTU,
e-mail : vai_nano@rgups.ru

С. А. Лукин, С. А. Васин, Е. В. Пантюхина

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ДИСКОВОГО БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ЗУБЬЯМИ И РЕГУЛИРУЕМЫМ ОРИЕНТАТОРОМ ДЛЯ ЗАГОТОВОК ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В ФОРМЕ КОЛПАЧКА

Аннотация. Рассмотрены основные виды заготовок тел вращения в форме колпачка с неявной и явной асимметрией и предложенное универсальное механическое дисковое бункерное загрузочное устройство с зубьями и регулируемым ориентатором для их автоматической загрузки в технологическое оборудование патронного производства. Описаны основные этапы проектирования универсального механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором, в процессе которого будет реализована загрузка различных по форме и размерам заготовок с возможностью быстрой переналадки с одного типоразмера на другой, обеспечено надежное функционирование при ориентировании заготовок, повышена вероятность захвата заготовок карманами универсального бункерного загрузочного устройства с целью увеличения его производительности.

Ключевые слова: проектирование загрузочного устройства, универсальное бункерное загрузочное устройство, ориентирование штучных заготовок.

Для цитирования: Лукин, С. А. Методика проектирования универсального механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка / С. А. Лукин, С. А. Васин, Е. В. Пантюхина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_28.

Механические дисковые бункерные загрузочные устройства (БЗУ) используются для ориентирования штучных заготовок (деталей, предметов обработки, готовых изделий и др.) перед подачей их на рабочие позиции технологического оборудования различного назначения. Массовые производства многих отечественных и зарубежных предприятий оснащены различными типами таких БЗУ, определяемыми формой заготовок, их размерами и характеристиками [1, 2].

Наиболее широко БЗУ используются при производстве патронов, где практически перед каждым участком производственного процесса заготовки в технологическое оборудование подаются с помощью разнообразных типов БЗУ. При этом для заготовок одной формы, но разных размеров могут использоваться или различные типы БЗУ, или БЗУ одного типа, но с различными геометрическими параметрами захватывающих и ориентирующих органов. При появлении новых видов патронов конструкторы регулярно делают новые расчеты и проектируют новые механизмы органов захвата и ориентирования заготовок. При этом размеры и форма заготовок при производстве новых патронов меняется в течение всего производственного цикла, поэтому потребность в разработке новых БЗУ для подачи заготовок на каждую технологическую операцию также существенно увеличивается пропорционально числу операций, на которые нужно подавать ориентированные заготовки.

БЗУ с зубьями нашли широкое применение для асимметричных заготовок тел вращения. Традиционно данный тип БЗУ использовался для заготовок в форме колпачка, имеющих явное смещение центра масс относительно середины заготовки [3]. Позже были предложены усовершенствованные БЗУ с зубьями и кольцевым ориентатором для полых или сплошных заготовок с торцом в форме усеченного конуса, а также ступенчатых заготовок или заготовок со сферическим торцом в форме колпачка, не имеющих смещения центра масс относительно середины [4–6].

Традиционные и усовершенствованные БЗУ обеспечивают надежное функционирование для заготовок с конкретными геометрическими размерами, но при изменении длины или диаметра заготовки требуется разработка новых по размерам захватывающих и ориентирующих органов, требующая существенных материальных и временных затрат. Поэтому в современных условиях важнейшим и актуальным направлением развития автоматизированных производств в области автоматической загрузки

штучных заготовок на рабочие позиции технологического оборудования является разработка универсальных БЗУ, способных в кратчайшие сроки перенастраиваться на ориентирование заготовок с другими геометрическими размерами формами.

Универсальное бункерное загрузочное устройство с зубьями и регулируемым ориентатором для различных заготовок тел вращения в форме колпачка

Заготовки тел вращения различных форм, широко встречающиеся в патронном производстве для спортивно-охотничьих патронов, характеризуются различным соотношением параметров d_1 (диаметр наибольшего торца), d_2 (диаметр меньшего торца), l (длина), а также координатой центра масс x_c (явное или неявное смещение), и имеющие с одной стороны закрытый торец (в дальнейшем – заготовки в форме колпачка), представлены на рис. 1.

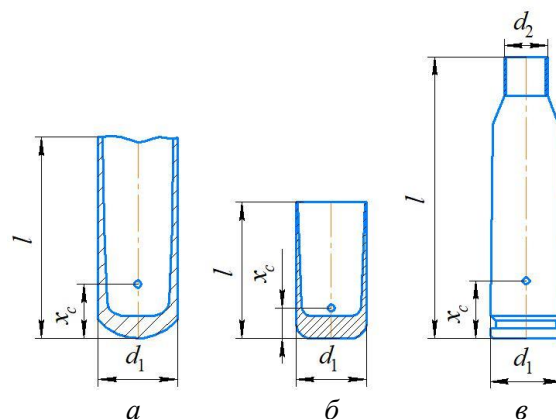


Рис. 1. Заготовки в форме колпачка, встречаемые в патронном производстве, с явным смещением центра масс:

a – полуфабрикат гильзы до обрезки; *б* – полуфабрикат гильзы после обрезки; *в* – гильза

Для ориентирования заготовок в форме колпачка с целью их дальнейшей подачи в технологическое оборудование было предложено универсальное БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором – копиром в форме сегмента окружности, расположенного в пазу неподвижного основания. БЗУ работает на основе смещения и в зависимости от расположения центра масс заготовки относительно ее середины (рис. 2).

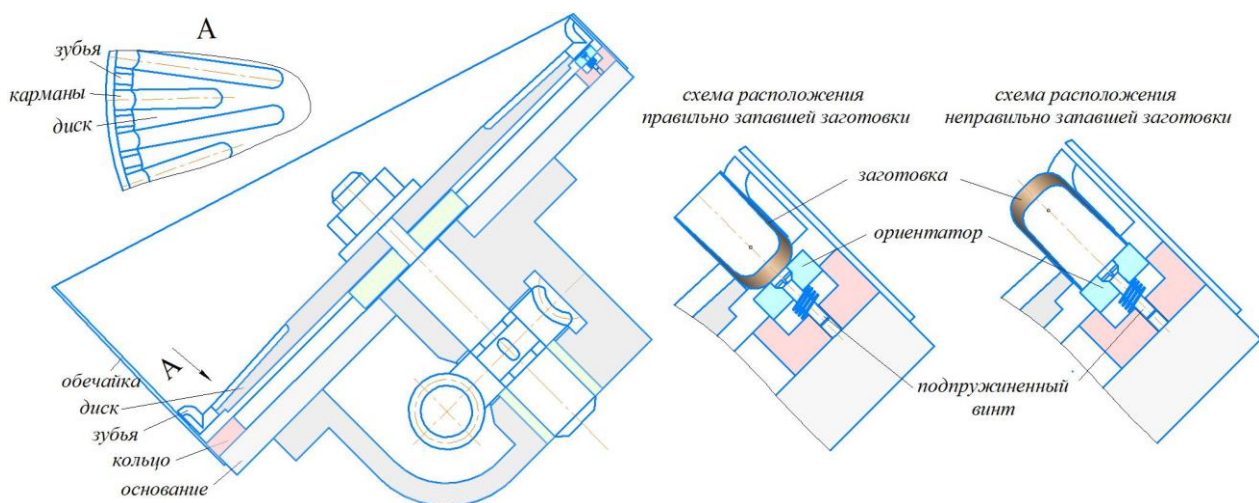


Рис. 2. Универсальное БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором и схемы его функционирования

В универсальном БЗУ на основании расположено кольцо, имеющее кольцевую проточку в верхней части. В проточке устанавливается и регулируется с помощью подпружиненных болтов ориентатор,

высота которого сначала плавно увеличивается от нуля до максимальной величины в направлении перемещения заготовок, а затем остается постоянной до конца кольцевой проточки. Неправильно запавшие в карманы заготовки, в отличие от правильно запавших, в верхней части выпадают обратно в нижнюю часть под действием силы тяжести.

Учитывая особенности механических дисковых БЗУ, их проектирование должно способствовать реализации в нем загрузки различных по форме и размерам заготовок с возможностью быстрой перенастройки с одного типоразмера на другой, обеспечению надежного функционирования БЗУ при ориентировании заготовок, повышению вероятности захвата заготовок карманами БЗУ с целью повышения его производительности. Поэтому проектирование оптимальных по всем параметрам БЗУ должно осуществляться в рамках комплексной методологии, включающей не только проектирование, но и исследование процессов функционирования БЗУ. Она содержит принципы конструирования органов захвата и ориентирования БЗУ, совокупности связей и закономерностей между параметрами БЗУ и заготовками, методики для определения искомых параметров БЗУ [7]. Решение всех перечисленных задач проектирования БЗУ должно решаться с научных позиций на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Описание методики проектирования универсального бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором

На рис. 2 представлена методика проектирования универсального БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором.

Традиционно начальным этапом проектирования БЗУ является выбор из существующих БЗУ того, которое сможет обеспечить загрузку требуемого типа заготовок. На данном этапе необходимо проанализировать возможности каждого из них по захвату и ориентированию заготовок с заданными геометрическими параметрами и выбрать наиболее оптимальное. Если какие-либо показатели выбранного БЗУ не отвечают поставленным требованиям производительности, надежности или не соответствуют другим требуемым характеристикам, необходимо усовершенствовать одно из существующих БЗУ или разработать новую конструкцию.

Предлагаемое усовершенствованное БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором может быть использовано для всех рассматриваемых типов загружаемых заготовок, поэтому перейдем к основным этапам его проектирования.

Конструктивные ограничения на органы захвата и ориентирования разрабатываются из следующих соображений.

Захватывающий орган БЗУ, представляющий собой карман с размерами l_k (длина), h_k (ширина) и H (высота), должен с высокой вероятностью захватить заготовку в правильном положении и удержать ее в верхней части бункера, предотвратив выпадение из кармана.

С одной стороны, чем шире карман, тем больше вероятность западания в него заготовки и тем шире возможности БЗУ при захвате заготовок с различными диаметрами d_1 . Теоретически ширина кармана h_k может быть ограничена лишь тем, чтобы в него при наличии в нем запавшей заготовки не западала вторая заготовка и в этот момент не происходило заклиниваний, то есть $h_k < 2d_1$. Однако увеличение ширины кармана приведет к уменьшению количества захватывающих органов, которые можно расположить по окружности захватывающего диска, что приведет к снижению производительности. Поэтому рекомендуется выбирать ширину кармана в диапазоне

$$1,2d_1 \leq h_k \leq 1,6d_1.$$

Длина l_k кармана должна быть выбрана таким образом, чтобы заготовка, запавшая в карман в неправильном положении (открытым торцом), смогла выпасть из кармана, опрокидываясь на краю кармана (точка B) вращающегося диска, то есть

$$l_k > \sqrt{d_1^2 + H^2}.$$

Высота H кармана, образованная верхней стороной регулируемого ориентатора и крайней точкой B вращающегося диска, определяется из условия

$$l - x_c - 0,5d_1 \operatorname{ctg} \alpha_6 \leq H \leq x_c - 0,5d_1 \operatorname{ctg} \alpha_6,$$

где α_6 – угол наклона вращающегося диска.

Кольцевая проточка в нижней части вращающегося диска имеет размеры $b_{\text{п}}$ (ширина) и $h_{\text{п}}$ (высота). При этом высота проточки не должна быть больше половины ширины s вращающегося диска в зоне точки B , где начинается карман. Ширина проточки имеет величину, не превышающую ширину h_0 кольца и позволяющую осуществлять регулировку ориентатора по высоте

$$h_0 \geq b_{\text{п}} > h_{\text{п}}.$$

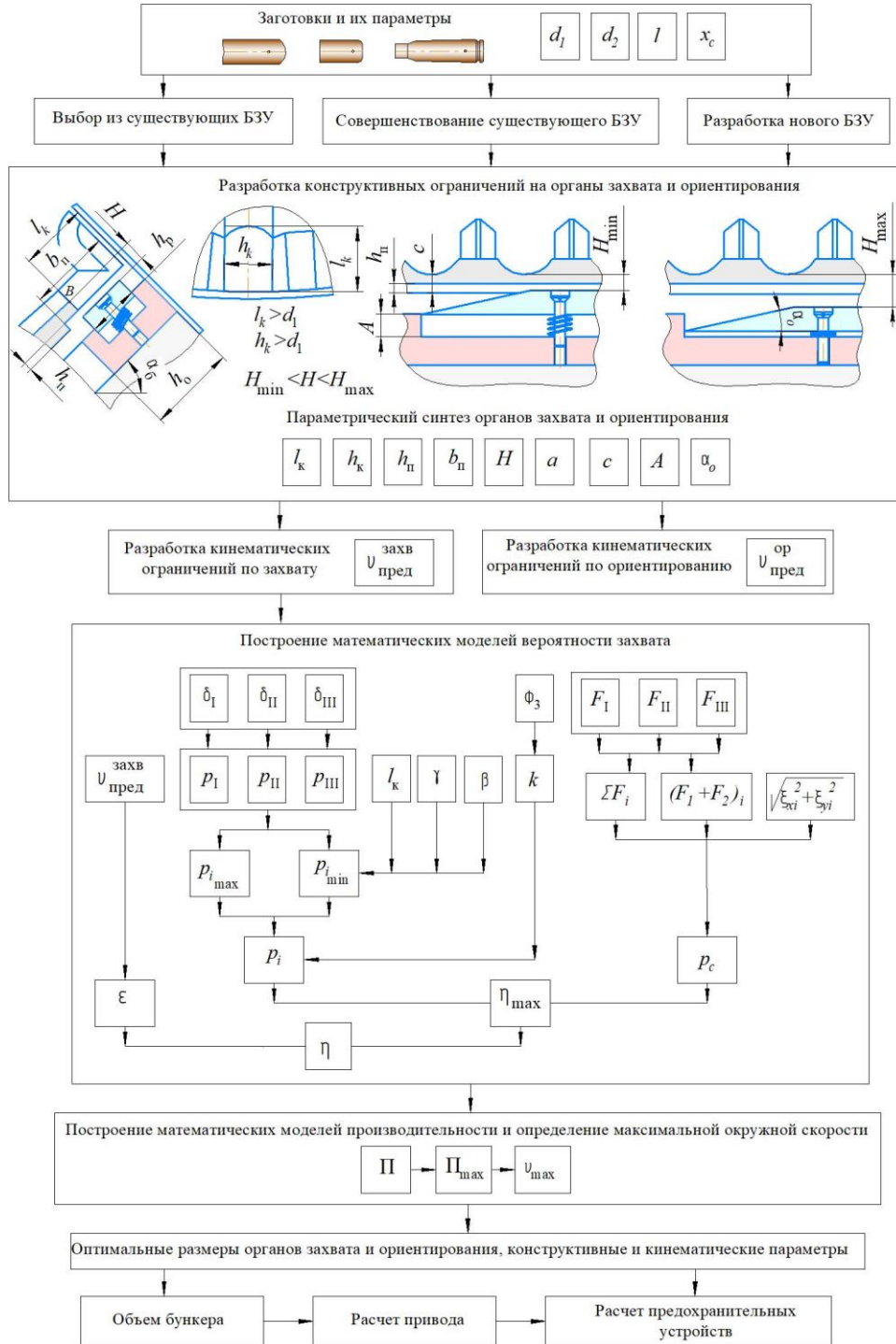


Рис. 3. Методика проектирования универсального БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором

Высота A паза кольца определяет возможности регулировки ориентатора по высоте. При этом регулируемый ориентатор изначально расположен на уровне $0,3\text{--}0,5$ мм ниже края кольцевого паза, поэтому минимально возможной шириной кармана будет величина $H_{\min} = A - (0,3\text{--}0,5 \text{ мм})$, а его максимальная ширина определится высотой Δ максимального сжатия пружины $H_{\min} = A - (0,3\text{--}0,5 \text{ мм}) - \Delta$. Угол α_0 подъема регулируемого ориентатора должен определяться возможностями движения по нему заготовок без заклиниваний экспериментально или теоретически.

Таким образом, при определении граничных диапазонов значений конструктивных параметров захватывающих и ориентирующих органов предполагается, что захватывающие органы должны обеспечивать захват заготовок с высокой вероятностью, способствуя повышению производительности БЗУ, а ориентирующие – надёжное ориентирование заготовок. Ширина и длина органов захвата ограничена условием, при котором будет обеспечен захват только одной заготовки. Все выражения должны быть получены исходя из конфигурации заготовок в захватывающих и ориентирующих органах БЗУ с учетом их возможных перемещений. Параметрический синтез полученных диапазонов конструктивных параметров органов захвата и ориентирования будет способствовать выбору оптимальных конструктивных параметров БЗУ, при которых он будет надёжно выполнять свои функции.

После определения конструктивных ограничений необходимо определить кинематические ограничения на параметры БЗУ – окружную скорость карманов вращающегося диска, при которых будут обеспечиваться и захват заготовок, и их ориентирование.

Для определения предельной окружной скорости $v_{\text{пред}}^{\text{захв}}$ по захвату применяется гипотеза, заключающаяся в том, что вероятность захвата заготовок равна нулю, когда сообщенная заготовке движущимся карманом кинетическая энергия достаточна для ее выброса из кармана на высоту, определяемую конструкцией БЗУ [8]. Для БЗУ с зубьями было получено следующее выражение:

$$v_{\text{пред}}^{\text{захв}} = \left(0,5 \frac{h_3}{d_1} + 1 + \frac{\Delta t}{d_1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{d_1}{h_3 + \sqrt{h_3^2 + d_1^2}} \right) \cdot \sqrt{d_1 g \sin \alpha_0},$$

где h_3 – высота зубьев; Δt – выбранный зазор между карманом и запавшей в него заготовкой [9].

Для определения предельной окружной скорости $v_{\text{пред}}^{\text{ор}}$ по ориентированию из условий статического равновесия определяется угол, при котором начинается процесс выпадения заготовки из кармана, а затем с помощью составления дифференциальных уравнений движения заготовки на всех этапах ориентирования и их последующего решения численными методами с использованием разработанных компьютерных программ [10].

Для построения математической модели вероятности захвата используем выражение и методику его определения, предложенные в работах [11, 12]:

$$\eta = p_i p_c (1 - \varepsilon \cdot v^4),$$

в котором p_i , p_c – вероятности нахождения заготовок по направлению к органу захвата в положении, благоприятном для захвата, и вероятность того, что захвату не помешает взаимосцепляемость заготовок;

ε – коэффициент, определяемый окружной скоростью $v_{\text{пред}}^{\text{захв}}$ по выражению $\varepsilon = \frac{1}{v_{\text{пред}}^{\text{захв}^4}}$.

Вероятность p_i зависит от той поверхности заготовки, которой она должна упасть на вращающийся диск, и той стороны заготовки, которой она должна повернуться к карману. Каждая из сторон заготовки характеризуется углом δ_i , а вероятность падения на данную сторону определится как $p_i = 0,5(1 - \cos 0,5\delta_i)$. Затем необходимо определить вероятность $p_{i_{\max}}$ и вероятность $p_{i_{\min}}$, в которой углы γ и β определяются размерами кармана и заготовки. Для разработанного универсального БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором:

$$p_{i_{\max}} = p_{\text{II}} + \frac{p_{\text{III}}}{2\pi} (\delta_{\text{II}} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha}), \quad p_{i_{\min}} = p_{\text{II}} + \frac{p_{\text{III}}}{2\pi} (\gamma - \beta),$$

где μ – коэффициент трения между заготовками БЗУ.

Зона захвата изделий определяется по формуле

$$\phi_3 = 2 \arccos \frac{\mu \cdot \sin 2\alpha_6 + \mu \cdot \sqrt{\sin^2 2\alpha_6 - 4 \sin^2 \alpha_6 \cdot (1 + \mu^2)} \cdot \cos 2\alpha_6}{2 \sin^2 \alpha_6 \cdot (1 + \mu^2)}.$$

Вероятность p_i определится по выражению

$$p_i = 1 - (1 - p_{i_{\max}})^3 (1 - p_{i_{\min}})^{\frac{R\phi_g}{d_1}},$$

где R – радиус диска в зоне расположения органов захвата.

Вероятность p_c определяется по выражению

$$p_c = 1 - \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n F_i} \sum_{i=1}^{n^2} \left[\sqrt{\xi_{i_x}^2 + \xi_{i_y}^2} \cdot (F_1 + F_2)_i \right],$$

где F_i , $\sum_{i=1}^n F_i$ – площади каждой из n сторон изделия и их сумма; ξ_i – допустимые углы, на которые можно повернуть две соприкасающихся различными поверхностями заготовок по осям x (ξ_{i_x}) и y (ξ_{i_y}) без разъединения с учетом коэффициента трения между заготовками μ_0 .

Тогда

$$\eta = \left[1 - (1 - p_{i_{\max}})^3 (1 - p_{i_{\min}})^{\frac{R\phi_g}{d_1}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n F_i} \sum_{i=1}^{n^2} \left[\sqrt{\xi_{i_x}^2 + \xi_{i_y}^2} \cdot (F_1 + F_2)_i \right] \right] \left[1 - \frac{v^4}{v_{\text{захв 4}}^4} \right].$$

Фактическая производительность БЗУ

$$\Pi = \eta \cdot \frac{60v}{t},$$

где t – шаг органов захвата, определяемый как сумма d_1 , Δt и ширины зуба.

Затем с помощью построенной модели и определения ее производной определяется максимальная производительность БЗУ и окружная скорость органов захвата, при которой она достигается.

Результатом проведенных исследований на всех этапах проектирования будут выбранные оптимальные параметры предложенного универсального БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором, при которых будут обеспечены его наилучшие качественные показатели – производительность и надежность при ориентировании заготовок в форме колпачка, для обеспечения которых в дальнейшем будут определены по известным выражениям объем бункера, рассчитаны привод и предохранительные устройства.

Список литературы

1 **Пантюхина, Е. В.** Механические бункерные загрузочные устройства для элементов патронов стрелкового оружия с неявной асимметрией / Е. В. Пантюхина, В. В. Прейс // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : труды Двенадцатой общероссийской научно-практической конференции. В 3 т. Т. 2. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 79–85. – ISBN 978-5-94652-656-2.

References

1 **Pantukhina, E. V.** Mechanical hopper loading devices for small arms cartridge elements with implicit asymmetry / E. V. Pantukhina, V. V. Preys // Innovative technologies and technical means of special purpose : Proceedings of the Twelfth All-Russian Scientific and Practical Conference. In 3 vols. Vol. 2. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 79–85. – ISBN 978-5-94652-656-2.

- 2 **Давыдова, Е. В.** Механические бункерные загрузочные устройства в пищевой промышленности / Е. В. Давыдова, В. В. Прейс. – Тула : ТулГУ, 2012. – 164 с.
- 3 **Камышный, Н. И.** Автоматизация загрузки станков / Н. И. Камышный. – Москва : Машиностроение, 1977. – 288 с.
- 4 **Патент № 100942 Российская Федерация, МПК В23Q 7/02.** Бункерное загрузочное устройство / В. В. Голубенко, Е. В. Давыдова, В. В. Прейс. – № 2010132798/02 ; заявл. 04.08.2010 ; опубл. 10.01.2011. Бюл. № 1. – 13 с.
- 5 **Патент 106577 Российская Федерация, МПК В23Q 7/00.** Бункерное загрузочное устройство / В. В. Голубенко, Е. В. Давыдова, В. В. Прейс, Д. А. Провоторов. – № 2011110272/02 ; заявл. 17.03.2011 ; опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20. – 12 с.
- 6 **Патент 159403 Российская Федерация, МПК В23Q 7/02.** Бункерное загрузочное устройство / В. В. Прейс, Е. В. Давыдова, А. В. Хачатурян. – № 2015127299/02 ; заявл. 07.07.2015 ; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4. – 14 с.
- 7 Методологический подход к исследованию и проектированию механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств / С. А. Васин, С. Н. Шевченко, Е. В. Пантюхина, А. А. Маликов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 26, № 1. – 2024. – С. 70–75. – DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-1-70-75.
- 8 Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками / В. Ф. Прейс [и др.] ; под редакцией В. Ф. Прейса. – Москва : Машиностроение, 1975. – 280 с.
- 9 Теоретическое и экспериментальное исследование производительности зубчатого бункерного загрузочно-ориентирующего устройства для асимметричных деталей тел вращения / С. А. Васин, С. Н. Шевченко, Е. В. Пантюхина, С. А. Лукин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 63–69. – DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-1-63-69.
- 10 **Pantuykhina, E. V.** Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves / E. V. Pantuykhina, V. V. Preis, O. V. Pantuykhin // IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conference Series 1791 (2021) 012105. – DOI 10.1088/1742-6596/1791/1/012105.
- 11 **Pantuykhina, E. V.** Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices / E. V. Pantuykhina // IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conf. Series 1546 (2020) 012024. – DOI 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.
- 2 **Davydova, E.V.** Mechanical hopper loading devices in the food industry / E. V. Davydova, V. V. Preis. – Tula : TulSU, 2012. – 164 p.
- 3 **Kamyshny, N. I.** Automation of machine loading / N. I. Kamyshny. – Moscow : Mechanical Engineering, 1977. – 288 p.
- 4 **Patent 100942 Russian Federation, IPC B23Q 7/02.** Hopper loading device / V. V. Golubenko, E. V. Davydova, V. V. Preis. – No 2010132798/02 ; declared 04.08.2010 ; publ. 10.01.2011. Bul. No 1. – 13 p.
- 5 **Patent 106577 Russian Federation, IPC B23Q 7/00.** Hopper loading device / V. V. Golubenko, E. V. Davydova, V. V. Preis, D. A. Provotorov. – No 2011110272/02; declared 17.03.2011 ; publ. 20.07.2011. Bul. No 20. – 12 p.
- 6 **Patent 159403 Russian Federation, IPC B23Q 7/02.** Hopper loading device / V. V. Preis, E. V. Davydova, A. V. Khachaturian. – No 2015127299/02 ; declared 07.07.2015 ; publ. 10.02.2016. Bul. No 4. – 14 p.
- 7 Methodological approach to the study and design of mechanical disk hopper loading and orienting devices / S. A. Vasin, S. N. Shevchenko, E. V. Pantuykhina, A. A. Malikov // The Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – Vol. 26, No. 1. – 2024. – P. 70–75. – DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-1-70-75.
- 8 Automation of loading presses with piece blanks / V. F. Preis [et al.] ; edited by V. F. Preis. – Moscow : Mechanical Engineering, 1975. – 280 p.
- 9 Theoretical and experimental study of the performance of a toothed hopper loading and orienting device for asymmetric parts of bodies of revolution / S. A. Vasin, S. N. Shevchenko, E. V. Pantuykhina, C. A. Lukin // The Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2024. – Vol. 26, No. 1. – P. 63–69. – DOI 10.37313/1990-5378-2024-26-1-63-69.
- 10 **Pantuykhina, E. V.** Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves / E. V. Pantuykhina, V. V. Preis, O. V. Pantuykhin // IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conference Series 1791 (2021) 012105. – DOI 10.1088/1742-6596/1791/1/012105.
- 11 **Pantuykhina, E. V.** Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices / E. V. Pantuykhina // IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conf. Series 1546 (2020) 012024. – DOI 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.

12 **Васин, С. А.** Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах / С. А. Васин, Е. В. Пантюхина // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2023. – № 3. – С. 64–88. – DOI 10.18698/0236-3941-2023-3-64-88.

12 **Vasin, S. A.** Methodology for determining the probability of capturing asymmetric elements of the shape of revolution bodies in disk hopper loading and orienting devices / S. A. Vasin, E. V. Pantyukhin // Bulletin of the Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Ser. Mechanical Engineering. – 2023. – No 3. – P. 64–88. – DOI 10.18698/0236-3941-2023-3-64-88.

S. A. Lukin, S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina

PROCEDURE FOR DESIGNING UNIVERSAL MECHANICAL DISK HOPPER LOADING DEVICE WITH TEETH AND ADJUSTABLE ORIENTATOR FOR BLANKS OF BODIES OF REVOLUTION IN THE FORM OF A CAP

Abstract. The article considers the main types of blanks of bodies of revolution in the form of a cap with implicit and explicit asymmetry and the proposed universal mechanical disk hopper loading device with teeth and an adjustable orientator for their automatic loading into the technological equipment of cartridge production. The study describes the main stages of designing a universal mechanical disk hopper loading device with teeth and an adjustable orientator, during which loading of blanks of various shapes and sizes will be implemented with the possibility of quick readjustment from one standard size to another, reliable operation during blank orientation will be ensured, the probability of blank capture by pockets of the universal hopper loading device will be increased in order to increase its productivity.

Keywords: design of loading device, universal hopper loading device, piece blanks orientation.

For citation: Lukin, S. A. Procedure for designing universal mechanical disk hopper loading device with teeth and adjustable orientator for blanks of bodies of revolution in the form of a cap / S. A. Lukin, S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 3. – P. 28–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_28.

Сведения об авторах

Лукин Сергей Анатольевич

Генеральный директор завода,
e-mail: tpz@tulammo.ru

Васин Сергей Александрович

Тульский государственный университет (ТулГУ),
кафедра городского строительства, архитектуры и
дизайна,

доктор технических наук, профессор,
e-mail: vasin_sa53@mail.ru

Пантюхина Елена Викторовна

Тульский государственный университет (ТулГУ),
кафедра «Промышленная автоматика
и робототехника»,

доктор технических наук, доцент,
e-mail: e.v.pant@mail.ru

Information about the authors

Lukin Sergey Anatolyevich

General Director,
e-mail: tpz@tulammo.ru

Vasin Sergey Alexandrovich

Tula State University (TulSU),
Chair of Urban Development, Architecture and
Design,

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: vasin_sa53@mail.ru

Pantyukhina Elena Viktorovna

Tula State University (TulSU),
Chair «Industrial Automation and Robotics»,
Doctor of Engineering Sciences,

Associate Professor,
e-mail: e.v.pant@mail.ru

Д. С. Мантуров, И. В. Больших, Е. П. Больших

МАТРИЧНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ ДЛЯ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ *

Аннотация. Рассмотрены вопросы применения нового матричного связующего для антифрикционного полимерного композиционного покрытия. В разрабатываемом покрытии применяется армирующий каркас на основе органических волокон, включающий политетрафторэтиленовые волокна (ПТФЭ) и полиамидные нити. В качестве адгезива было выбрано растворное связующее на основе фенилона, модифицированное наполнителями. В исследовании многокомпонентных систем, таких как композитные материалы, возникает задача определения влияния каждого компонента на свойства конечного продукта. Для решения этой задачи предлагается использовать симплекс-решётчатые планы. Это обеспечивает достаточно полное установление влияния каждого компонента на результирующие свойства композита и позволяет получить более точные и надежные результаты.

Ключевые слова: полимерные материалы, армирующий каркас, фенилон, порошок меди, диметилсульфоксид, вязкость, симплекс-решётчатые планы, матрица планирования.

Для цитирования: Мантуров, Д. С. Матричное связующее для антифрикционного полимерного композиционного покрытия / Д. С. Мантуров, И. В. Больших, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_36.

Трение играет одну из ведущих ролей в машиностроении. В большинстве случаев процесс взаимодействия сосредоточен в поверхностных слоях контактирующих деталей. По этой причине в настоящее время особое внимание уделяется расширению области применения антифрикционных покрытий, к которым относятся и рассматриваемые в данной работе полимерные материалы [1–3].

В основе разрабатываемого покрытия применяется армирующий каркас на основе органических волокон, включающий политетрафторэтиленовые волокна (ПТФЭ) и полиамидные нити. Применяемые волокна фторопласта выполняют антифрикционную функцию, так как обладают способностью к самосмазыванию, а полиамидные нити роль адгезива для фиксации покрытия на поверхности субстрата (рис. 1, *а, б*). Как показано на рис. 1, на рабочей стороне находятся волокна ПТФЭ (рис. 1, *а*), а на изнанку, прилегающую к поверхности субстрата, выведены нити полиамида (рис. 1, *б*) [4–6].

Для фенилона в качестве растворителя применялся диметилсульфоксид (ТУ 2635-114-44493179-08), температура кипения которого достигает 186 °С. Данный факт требует включения в технологию изготовления связующего этапа предварительной просушки, при котором армирующий каркас полностью пропитывается разработанным составом при комнатной температуре в течение 3 часов [7]. Покрытие укладывается таким образом, чтобы волокна политетрафторэтилена находились внизу. За это время связующее полностью пропитывает волокна каркаса и схватывается, но остается достаточно эластичным для дальнейшей его наклейки на поверхности субстрата [8–10].

Выбор концентрации фенилона и диметилсульфоксида определялся вязкостью связующего, которая позволяет добиться полной пропитки каркаса. Исследование реологических свойств растворов полимеров проведено на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1 в системе коаксиальных цилиндров при скорости сдвига от 10 до 100 с⁻¹ и постоянной температуре 25 °С.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (Соглашение от 10.01.2024 г. № 109-03-2024-007).



Рис. 1. Каркас композита

На начальном этапе для установления оптимальной концентрации фенолона и диметилсульфоксида (ДМСО) в связующем, а также достижения необходимой вязкости были выбраны различные соотношения:

- 1) 5 % фенолона и 95 % ДМСО;
- 2) 10 % фенолона и 90 % ДМСО;
- 3) 30 % фенолона и 70 % ДМСО.

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы:

- состав с концентрацией 5 % фенолона и 95 % ДМСО обладает высокой текучестью, что приводит к увеличению расхода связующего и, как следствие, низкой адгезии;
- состав с концентрацией 30 % фенолона и 70 % ДМСО показал высокую вязкость, что способствует неравномерному распределению связующего, росту усадочных напряжений и снижает адгезионную прочность.

Путём проведения дальнейшего подбора концентраций нами было установлено, что оптимальная концентрация полимера находится в диапазоне 15–16 %. На рис. 2 показан график зависимости эффективной вязкости полимера от скорости сдвига.

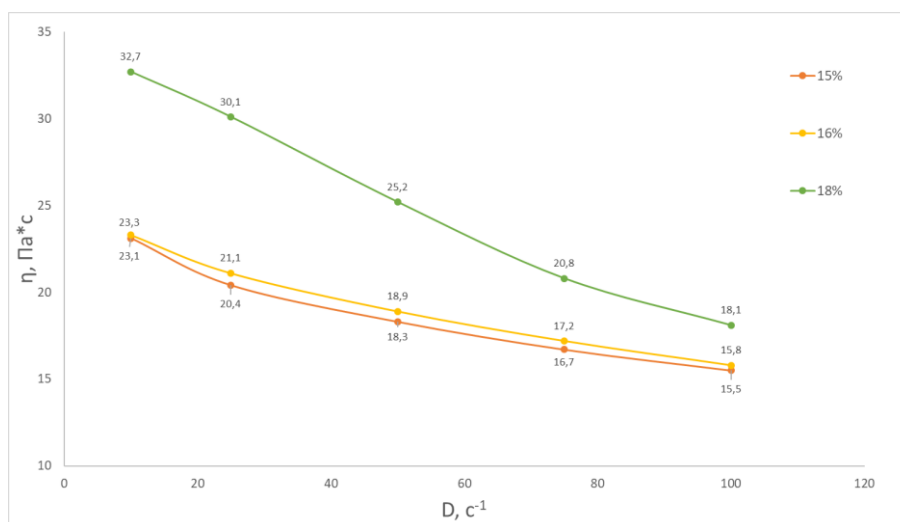


Рис. 2. Графическая зависимость эффективной вязкости η фенолона от скорости сдвига D

Основываясь на полученных данных, можно сделать вывод, что связующее с концентрацией фенолона ниже 15 % обладает повышенной текучестью и приводит к растеканию связующего, а выше 16 % не позволяет достичь требуемой степени пропитки армирующего каркаса и равномерного распределения по его поверхности.

В качестве матричного материала было выбрано растворное связующее на основе фенилона, модифицированное наполнителями. Применение наполнителей позволяет в значительной степени улучшить триботехнические свойства конечного продукта. В данном исследовании в качестве независимой переменной выступает соотношение компонентов, входящих в состав матричного связующего:

- фенилон (ГОСТ 23519-93) + диметилсульфоксид (ТУ 2635-114-44493179-08);
- порошок меди;
- масло И-40.

Применяя модификаторы, можно достичь снижения коэффициента трения, что в свою очередь приводит к уменьшению температуры благодаря смазывающему эффекту масла. Кроме того, добавление индустриального масла в качестве наполнителя в матричный компаунд существенно улучшает коррозионную устойчивость металлических контртел, которые взаимодействуют с покрытием.

Одним из способов повышения прочностных свойств и теплофизических характеристик является применение медного порошка. В свою очередь порошок меди может выступать в роли донора электронов, позволяющих блокировать активные макрорадикалы, появляющиеся под действием термоокислительной деструкции. Этот процесс актуален для материалов, которые работают в условиях высоких температур и окислительной среды. Включение в состав связующего медного порошка может позволить достичь образования избирательного переноса на контртело при определённых условиях. Это происходит за счёт выделения атомов меди по причине разрушения межатомных связей на поверхности трения. Данный процесс может позволить достичь увеличения прочности материала, повысить его сопротивление деформации и разрушению, а также улучшить теплопроводность и теплоемкость. Важно отметить, что медный порошок сам по себе обладает уникальными свойствами, делающими его привлекательным материалом для различных областей применения [11–13].

В исследовании многокомпонентных систем, таких как композитные материалы, возникает задача определения влияния каждого компонента на свойства конечного продукта. Традиционные многофакторные планы эксперимента, такие как планы полного факторного эксперимента, сталкиваются с ограничениями, когда необходимо исследовать большое количество компонентов. Это связано с тем, что количество необходимых экспериментов растёт экспоненциально с увеличением числа факторов. В таких случаях требуется более эффективный подход. Симплекс-решётчатые планы предлагают решение этой проблемы (рис. 3). Они позволяют изменять количество каждого компонента в системе независимо друг от друга, что существенно расширяет возможности исследования. Выбор плана полного 3-го порядка для проведения эксперимента означает, что будут исследованы все комбинации компонентов в системе. Это обеспечивает достаточно полное установление влияния каждого компонента на результирующие свойства композита. Симплекс-решётчатые планы полного 3-го порядка позволяют получить более точные и надёжные результаты, чем обычные многофакторные планы, за меньшее количество экспериментов. В то же время SR-план 3-го порядка позволяет изучать не только линейное, но и квадратичное влияние компонентов на свойства композита. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что использование SR-плана 3-го порядка является эффективным инструментом для исследования многокомпонентных систем, позволяющим установить влияние каждого компонента на свойства конечного продукта.

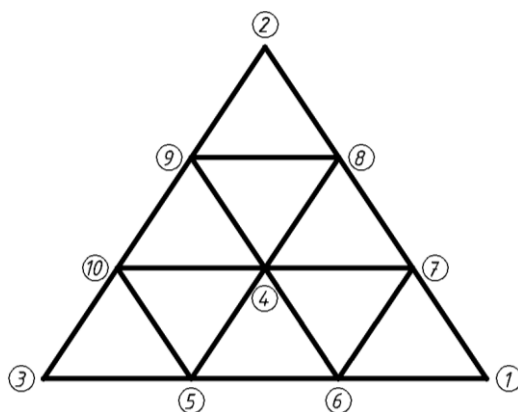


Рис. 3. SR-план полного 3-го порядка для трёхкомпонентной смеси

Номера точек, представленные на рис. 3, соотносятся с номерами в матрице. Каждая точка симплекса связана с определённой комбинацией компонентов X_i и результатом Y . Вершины симплекса отражают содержание 100 % одного единственного компонента. В данном случае компоненты на вершинах симплекса 1, 2 и 3 уже представляют собой смеси нескольких веществ, таких как фенилон, индустриальное масло и медный порошок. Концентрация модификаторов представлена в матрице планирования и схеме SR-план полного 3-го порядка для трёхкомпонентной смеси.

Концентрация компонентов в каждой точке симплекс-решётчатого плана приведена в таблице. Матрицу строим, основываясь на модели полного третьего порядка.

Матрица симплекс-решётчатого плана

№	X1	X2	X3	Фенилон+ ДМСО	Масло	Порошок меди	Выход
1	1	0	0	92	7	1	Y_1
2	0	1	0	86	13	1	Y_2
3	0	0	1	86	7	7	Y_3
4	1/3	1/3	1/3	88	9	3	Y_{123}
5	1/3	0	2/3	88	7	5	Y_{133}
6	2/3	0	1/3	90	7	3	Y_{113}
7	2/3	1/3	0	90	9	1	Y_{112}
8	1/3	2/3	0	88	11	1	Y_{122}
9	0	2/3	1/3	86	11	3	Y_{223}
10	0	1/3	2/3	86	9	5	Y_{233}

На рис. 4 показан графический вид матрицы. Данная интерпретация позволяет подробно ознакомиться с точками на симплексе, которым соответствует различный состав матричного связующего.

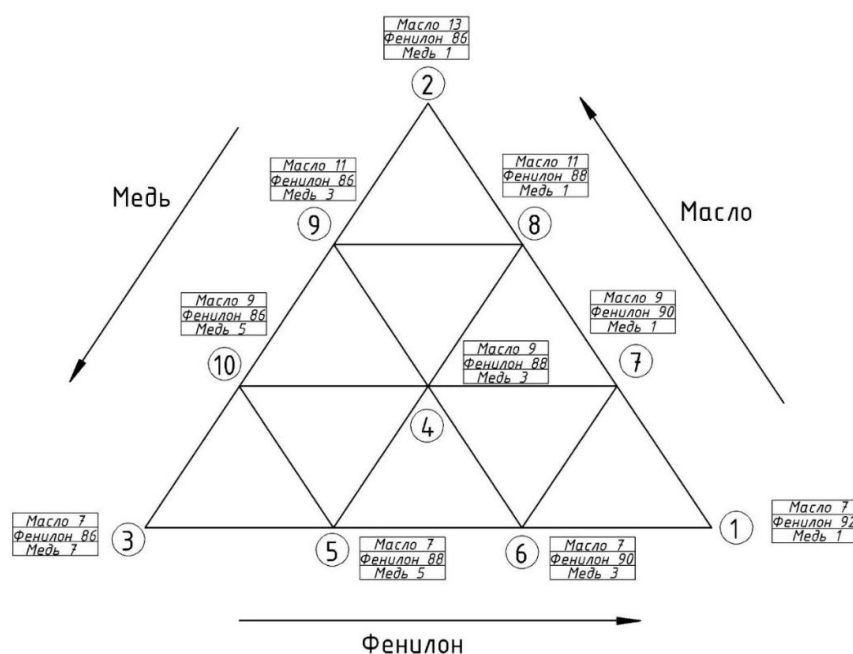


Рис. 4. Графическое интерпретирование SR-плана полного 3-го порядка

Направление стрелок указывает на увеличение количества конкретного компонента, к которому они обращены. Количество одинаковых цифр в индексе отражает число одинаковых долей этого компонента. Точки на гранях симплекса содержат исключительно те компоненты, которые соответствуют вершинам, соединённым этими гранями. Все точки, расположенные внутри симплекса, включают все компоненты смеси.

Выводы

- Определена оптимальная концентрация фенолона и растворителя диметилсульфоксида, которая позволяет достичь необходимой вязкости связующего, достаточной для равномерной пропитки матричного каркаса.
- В качестве модификаторов связующего выбраны медный порошок и индустриальное масло И-40, а также определена их концентрация в каждой точке симплекс-решётчатого плана.
- Отработана технология приготовления матричного связующего на основе фенолона.
- Необходимо проведение полного комплекса исследований по определению триботехнических параметров разработанного связующего и покрытия в целом.

Список литературы

- 1 **Колесников, В. И.** Двухслойные композиции триботехнического назначения для тяжело нагруженных узлов трения / В. И. Колесников, П. Г. Иваночкин. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2009. – 124 с. – ISBN 978-5-88814-242-4.
- 2 Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнических характеристик / В. И. Колесников, А. П. Сычев, В. Н. Кравченко [и др.] // Физика, механика, техника : сборник трудов Южного научного центра РАН. – Т. II. – Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2007. – С. 9–35.
- 3 **Колесников, И. В.** Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения : монография / И. В. Колесников ; отв. ред. Резер Семен Моисеевич; Российская академия наук. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2017. – 381 с. – ISBN 978-5-902928-72-0.
- 4 **Кохановский, В. А.** Износостойкость металлополимерных систем с композиционным покрытием / В. А. Кохановский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 13–19. – ISSN 1819-2092.
- 5 **Кохановский, В. А.** Армирующая компонента для антифрикционных композиционных покрытий / В. А. Кохановский // Управление, Конкурентоспособность. Автоматизация. – Ростов-на-Дону : ГОУДПО, 2002. – Вып. 1. – С. 73–79.
- 6 **Кохановский, В. А.** Матричные материалы антифрикционных композитов / В. А. Кохановский, М. А. Мукутадзе // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1. – № 2 (8). – С. 51–56.
- 7 **Кохановский, В. А.** Адгезия антифрикционных полимерных покрытий / В. А. Кохановский, И. В. Больших, Д. С. Мантуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (68). – С. 16–20. – ISSN 0201-727X.

References

- 1 **Kolesnikov, V. I.** Two-layer compositions of tribotechnical purpose for heavily loaded friction units / V. I. Kolesnikov, P. G. Ivanochkin. – Rostov-on-Don : RGUPS, 2009. – 124 p. – ISBN 978-5-88814-242-4.
- 2 Composite materials for friction units of rolling stock based on technical fabrics and their tribotechnical characteristics / V. I. Kolesnikov, A. P. Sychev, V. N. Kravchenko [et al.] // Physics, mechanics, technology : collection of works of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – Vol. II. – Rostov-on-Don : Publishing house of the YUNTS RAS, 2007. – P. 9–35.
- 3 **Kolesnikov, I. V.** Systems analysis and synthesis of processes occurring in metal-polymer friction units for friction and antifricion purposes : monograph / I. V. Kolesnikov ; ed. Rezer Semyon Moiseevich; Russian Academy of Sciences. – Moscow : All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 2017. – 381p. – ISBN 978-5-902928-72-0.
- 4 **Kohanovsky, V. A.** Wear resistance of metal polymer systems with composite coating / V. A. Kohanovsky // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2007. – No. 1. – P. 13–19. – ISSN 1819-2092.
- 5 **Kohanovsky V. A.** Reinforcing component for antifricion composite coatings. – V. A. Kohanovsky // Management, Competitiveness. Automation. – Rostov-on-Don : GOUDPO. – 2002. – Vol. 1. – P. 73–79.
- 6 **Kohanovsky, V. A.** Matrix materials of antifricion composites / V. A. Kokhanovsky, M. A. Mukutadze // Bulletin of DSTU. – 2001. – V. 1. – No. 2 (8). – P. 51–56.
- 7 **Kokhanovsky, V. A.** Adhesion of antifricion polymer coatings / V. A. Kokhanovsky, I. V. Bolshikh, D. S. Manturov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2017. – No. 4 (68). – P. 16–20. – ISSN 0201-727X.

- 8 **Больших, И. В.** Нанесение полимерных покрытий с матрицей холодного отверждения / И. В. Больших, В. А. Кохановский, А. В. Илларионов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 11–16. – ISSN 1818-5509.
- 9 **Кохановский, В. А.** Формирование антифрикционного композиционного покрытия / В. А. Кохановский, Е. А. Бородин // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1. – № 3 (9). – С. 155–159. – ISSN 1992-5980.
- 10 **Кохановский, В. А.** Структура и свойства антифрикционных волоконитов / В. А. Кохановский // Безызносность : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1992. – Вып. 2. – С. 132–137.
- 11 **Сидашов, А. В.** Применение метода РФЭС для изучения особенности строения, химической связи и состава границы раздела оксид-металл бинарного сплава нихром / А. В. Сидашов, А. Т. Козаков, М. В. Бойко // Известия РАН. Сер. Физ. – 2014. – Т. 78, № 4. – С. 385–397. – DOI 10.7868/S0367676514040371.
- 12 Surface Modification Features of Tool Steels by Laser Radiation / A. V. Sidashov, A. T. Kozakov, V. I. Kolesnikov [et al.] // Journal of Friction and Wear – 2020. – No. 41 (6). – P. 549–553. – DOI 10.3103/S1068366620060185.
- 13 **Колесников, В. И.** Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В. И. Колесников. – Москва : Наука, 2003. – 279 с. – ISBN 5-02-002843-6 : 1000.
- 8 **Bolshikh, I. V.** Application of polymer coatings with a cold-curing matrix / I. V. Bolshikh, V. A. Kokhanovsky, A. V. Illarionov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2016. – No. 3. – P. 11–16. – ISSN 1818-5509.
- 9 **Kokhanovsky, V. A.** Formation of antifriction composite coating / V. A. Kokhanovsky, E. A. Borodin // Bulletin of DSTU. – 2001. – Vol. 1. – No. 3 (9). – P. 155–159. – ISSN 1992-5980.
- 10 **Kohanovsky, V. A.** Structure and properties of antifriction fiber reinforced plastics / V. A. Kohanovsky / Wearlessness : collection of scientific tr. – Rostov-on-Don : RISKHM. – 1992. – Issue. 2. – P. 132–137.
- 11 **Sidashov, A. V.** Application of the XPS method to study the features of the structure, chemical bond and composition of the oxide-metal interface of a binary nichrome alloy / A. V. Sidashov, A. T. Kozakov, M. V. Boyko // Izv. RAS. Ser. Phys. – 2014. – Vol. 78. – No. 4. – P. 385–397. – DOI 10.7868/S0367676514040371.
- 12 Surface Modification Features of Tool Steels by Laser Radiation / A. V. Sidashov, A. T. Kozakov, V. I. Kolesnikov [et al.] // Journal of Friction and Wear – 2020. – No. 41 (6). – P. 549–553. – DOI 10.3103/S1068366620060185.
- 13 **Kolesnikov, V. I.** Thermophysical processes in metal polymer tribosystems / V. I. Kolesnikov. – Moscow : Nauka, 2003. – 279 p. – ISBN 5-02-002843-6 : 1000.

D. S. Manturov, I. V. Bolshikh, E. P. Bolshikh

MATRIX BINDING AGENT FOR ANTI-FRICTION POLYMER COMPOSITE COATING

Abstract. The article considers the application of a new matrix binder for an antifriction polymer composite coating. The coating being developed uses a reinforcing frame based on organic fibers, including polytetrafluoroethylene fibers (PTFE) and polyamide threads. A solution binder based on phenylone modified with fillers was chosen as an adhesive. In the study of multicomponent systems, such as composite materials, the problem of determining the effect of each component on the properties of the final product arises. To solve this problem, it is proposed to use simplex lattice plans. This ensures a fairly complete determination of the effect of each component on the resulting properties of the composite and allows obtaining more accurate and reliable results.

Keywords: polymer materials, reinforcing frame, phenylone, copper powder, dimethyl sulfoxide, viscosity, simplex lattice plans, planning matrix.

For citation: Manturov, D. S. Matrix binding agent for anti-friction polymer composite coating / D. S. Manturov, I. V. Bolshikh, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 3. – P. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_36.

Сведения об авторах**Мантуров Дмитрий Сергеевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
заведующий лабораторией,
кандидат технических наук,
e-mail: manturovds@rgups.ru

Больших Иван Валерьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Больших Елизавета Павловна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
аспирантка,
e-mail: elizaveta.mz@yandex.ru

Information about the authors**Manturov Dmitry Sergeevich**

Rostov State Transport University (RGUPS),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Head of Laboratory,
Candidate of Technical Sciences,
e-mail: manturovds@rgups.ru

Bolshikh Ivan Valerievich

Rostov State Transport University (RGUPS),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Bolshikh Elizaveta Pavlovna

Rostov State Transport University (RGUPS),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Postgraduate Student,
e-mail: elizaveta.mz@yandex.ru

Е. В. Пантюхина, С. А. Лукин, С. А. Васин

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО ДИСКОВОГО БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ЗУБЬЯМИ И РЕГУЛИРУЕМЫМ ОРИЕНТАТОРОМ ДЛЯ ЗАГОТОВОК ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В ФОРМЕ КОЛПАЧКА

Аннотация. Рассмотрена традиционная технология и основные этапы изготовления патронов. Показана необходимость применения систем автоматической загрузки с механическими дисковыми бункерными загрузочными устройствами для подачи с требуемой производительностью и высокой надёжностью в автоматические машины и линии патронного производства штучных заготовок и готовых изделий, имеющих форму тел вращения. Представлена универсальная конструкция механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка. Рассмотрен принцип функционирования и особенности наладки предложенной универсальной конструкции при ориентировании заготовок в форме колпачка, имеющих различное соотношение геометрических параметров.

Ключевые слова: системы автоматической загрузки, ориентирование заготовок, бункерное загрузочное устройство, патронное производство.

Для цитирования: Пантюхина, Е. В. Разработка универсальной конструкции механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка / Е. В. Пантюхина, С. А. Лукин, С. А. Васин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 43–49. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_43.

В последнее время в нашей стране происходит существенное изменение ситуации на рынке боеприпасов, обусловленное значительным увеличением государственного оборонного заказа на массовое производство патронов, увеличением их номенклатуры и расширением типоразмеров [1]. В сложившейся ситуации необходимо с максимальной эффективностью использовать все производственные мощности, значительно сократить сроки производства изделий, повысить производительность и надёжность технологического оборудования. В связи с этим при производстве патронов возникает целый комплекс важнейших задач, требующих рациональных и обоснованных решений в кратчайшие сроки.

Анализ патронного производства на различных заводах в нашей стране позволил выявить одну из важнейших задач, способствующих существенному повышению производительности технологического оборудования и минимизации численности работающего персонала. Она заключается в разработке систем автоматической загрузки (САЗ) заготовок (рондолей, колпачков, полуфабрикатов гильз и других элементов патронов) и готовых изделий в различное оборудование, реализующее технологический процесс изготовления патронов, состоящий из следующих этапов.

Сначала осуществляется вырубка рондоли из рулона с ее последующей химической и термической обработкой (ХиТО) на участке, включающем операции обезжиривания, отжига, травления и фосфатирования. Затем рондоль с помощью САЗ, благодаря которой осуществляется ориентирование неупорядоченных и засыпанных навалом рондолей и их выдача с требуемой производительностью и в заданном положении, подается на участок предварительной вытяжки. На данном участке в автоматической роторной линии происходят вытяжки I (свертка колпачка) и II, после которых реализуется ХиТО полуфабриката вытяжки II, который в дальнейшем посредством САЗ, выполняющих те же функции, подается на участок окончательной вытяжки, где выполняются его вытяжки III и IV и обрезка. Затем при необходимости производится ХиТО полуфабриката. Далее полученный после вытяжки IV полуфабрикат с помощью САЗ подается на участок штамповки дна, где также осуществляется пробивка запальных отверстий. Затем выполняется ХиТО полуфабрикатов с запальными отверстиями, после которой САЗ обеспечивают подачу указанных полуфабрикатов на операцию обжима дульца. Полуфабрикат с дульцем с помощью САЗ направляется на участок механической обработки полуфабрикатов гильзы, где осуществляются обточка, подрезка и операции контроля. После этого САЗ отправляют готовый полуфаб-

рикат гильзы на осмотр, по завершении которого аналогичные САЗ подают его на участок сборки патрона, где осуществляется капсулировка гильзы; гильзу со вставленным капсюлем направляют в автоматическую роторную линию, где происходит насыпка пороха и вставка пули, подаваемой с помощью САЗ. Собранный патрон САЗ отправляется на осмотр, и технологический цикл производства патрона завершается (рис. 1) [2, 3].



Рис. 1. Системы автоматической загрузки заготовок и готовых изделий в технологическое оборудование при изготовлении патронов

Как видно из приведенной схемы, перед каждым участком производственного процесса заготовки в технологическое оборудование подаются САЗ, необходимость наличия которых обусловлена тем, что после выполнения некоторых операций заготовки оказываются в неупорядоченном неориентированном положении. Поэтому САЗ в условиях автоматизированных производств должны обеспечить ориентирование и выдачу таких заготовок на каждое технологическое оборудование представленного технологического процесса патронного производства с требуемой производительностью и высокой надежностью [4].

Структура систем автоматической загрузки заготовок патронного производства

Типовая структурная схема САЗ (рис. 2) включает следующие основные устройства и их элементы: 1 – механическое дисковое бункерное загрузочное устройство (БЗУ) для ориентирования заготовок и его элементы: 1.1 – захватывающий, 1.2 – ориентирующий, 1.3 – бункерный и 1.4 – управляющий механизмы, 1.5 – захватывающие органы, 1.6 – привод, 1.7 – блок управления; 2 – транспортное устройство для подачи заготовок в САЗ; 3 – накопительное устройство для обеспечения запаса заготовок из-за вероятностного принципа работы БЗУ; 4 – выдающее устройство для синхронной подачи заготовок к рабочим органам технологического оборудования; Д1 – датчик контроля уровня засыпки заготовок в бункере бункерного механизма БЗУ, обеспечивающего необходимый запас заготовок; Д2 – датчик контроля переполнения (или опорожнения) накопительного устройства заготовками. Захватывающий механизм 1.1 состоит из различных по конфигурации органов захвата и привода 1.6 их движения. Ориентирующий механизм 1.2 выполняет функцию ориентирования и в некоторых БЗУ имеет отдельный привод. Блок управления 1.7 осуществляет работу внешнего транспортного устройства 2, обеспечивающего подачу заготовок в бункер по сигналу управляющего механизма 1.4, а также для остановки привода БЗУ при переполнении накопительного устройства 3 или заклинивании заготовок в движущихся рабочих органах [5].

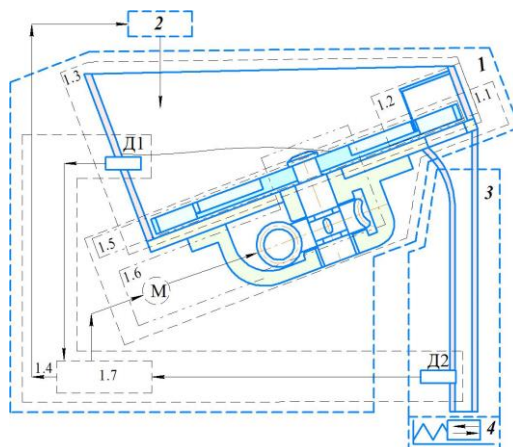


Рис. 2. Типовая структурная схема САЗ заготовок в технологическое оборудование

В зависимости от типа заготовки системы их автоматической загрузки отличаются конструкцией БЗУ, тип которого определяется в первую очередь формой и размерами загружаемых заготовок, асимметрией внешней или внутренней формы, смещением центра масс вдоль продольной оси [6]. Рассмотрев все возможные виды заготовок, встречающихся в патронном производстве, можно определить, что наиболее часто встречаются заготовки в форме колпачка, для загрузки которых на патронных заводах в настоящее время используются следующие основные типы БЗУ.

Для колпачков, внешний диаметр которых больше высоты заготовки, используется карманчиковое вертикальное БЗУ с горизонтальной осью вращения диска [7]. Для колпачков, длина которых в 1,3 и более раз превышает диаметр, используют карманчиковые БЗУ с зубьями или тангенциальное БЗУ с ножевыми опорами в верхней части бункера, в которых ориентирование заготовок основано на принципе явного смещения центра масс [8]. Для заготовок с неявной асимметрией внешней формы и отсутствием смещения центра масс предложены усовершенствованные БЗУ [9, 10].

Все рассмотренные БЗУ могут быть использованы только для конкретных заготовок с определенными геометрическими параметрами и свойствами, поэтому их использование для аналогичных по форме заготовок, но, например, с другим диаметром, длиной или смещением центра масс, возможно только в случае переконструирования их захватывающих и ориентирующих органов. В свою очередь, проектирование новых по конструкции и размерам рабочих органов БЗУ в связи с изменениями параметров заготовки является длительным и трудоемким процессом. Поэтому целесообразно стремиться к разработке универсальных конструкций БЗУ для заготовок определенной формы, способных переналаживаться под их любой размер. Это позволит расширить технические возможности БЗУ, повысить надежность их функционирования, существенно сократить сроки на переналадку технологического оборудования и тем самым существенно увеличить его производительность.

Описание разработанного универсального бункерного загрузочного устройства для заготовок в форме колпачка

На рис. 3 представлено универсальное механическое дисковое БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок в форме колпачка, у которых длина превышает диаметр в 1,3–3 раза. Предлагаемое универсальное БЗУ состоит из наклонно расположенного бункера, образованного обечайкой 1 и основанием 2, вращающегося диска 3 с равномерно расположенными по окружности радиальными пазами, переходящими в сквозные карманы, и зубьями 4.

На периферии основания 2 по окружности установлено кольцо 5, в верхней части которого располагается кольцевой паз. В нижней части вращающегося диска 3 по периферии имеется кольцевая проточка высотой, не превышающей 50 % его толщины, и шириной, не превышающей ширину кольца 5. В проточке размещается ориентатор, регулируемый с помощью трех подпружиненных винтов 7 по высоте в пределах кольцевого паза и кольцевой проточки. Высота регулируемого ориентатора сначала плавно изменяется в направлении перемещения заготовок от нулевой величины до максимальной величины, которая остается постоянной до конца ориентатора.

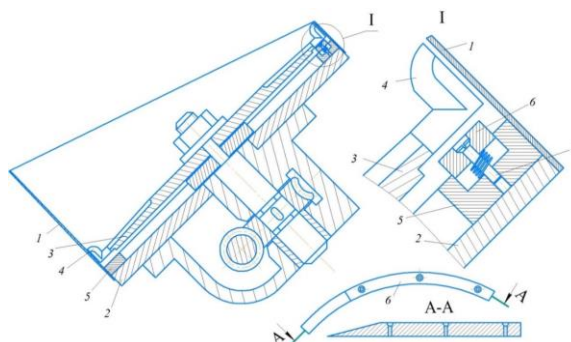


Рис. 3. Универсальное БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором и его основные элементы:
 1 – обечайка; 2 – основание; 3 – вращающийся диск; 4 – зубья; 5 – кольцо;
 6 – регулируемый ориентатор; 7 – подпружиненные винты

Усовершенствованное БЗУ функционирует следующим образом. При вращении вращающегося диска 3 заготовки, засыпанные в бункер, западают в радиальные пазы и сквозные карманы и перемещаются в верхнюю часть бункера. Заготовки, запавшие в радиальные пазы закрытым основанием вниз (рис. 4, а, в), поднимаясь по регулируемому ориентатору, удерживаются в карманах, перемещаются диском при его вращении к окну-приемнику и выдаются из БЗУ. Заготовки, запавшие в карманы 5 открытым основанием вниз (рис. 4, б, г), поднимаются по регулируемому ориентатору и под действием силы тяжести G выпадают из карманов и радиальных пазов обратно в бункер, реализуя принцип пассивного ориентирования заготовок.

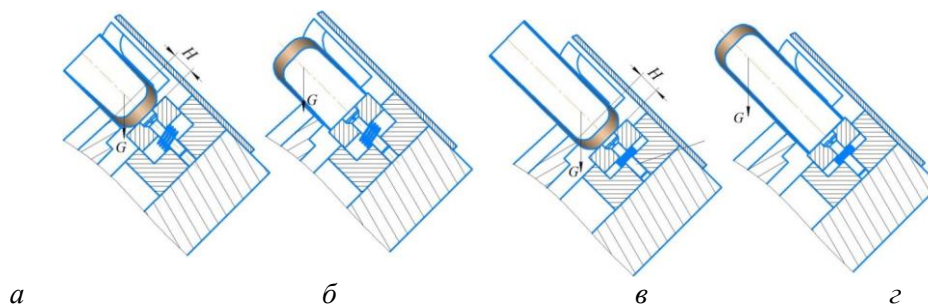


Рис. 4. Принцип функционирования универсального БЗУ для заготовок в форме колпачка, у которых длина превышает диаметр в 1,7 (а, б) и 2,8 (в, г) раз при правильном (а, в) и неправильном (б, г) западаниях в карман

Наладка БЗУ осуществляется следующим образом. В зависимости от длины и других размеров заготовки производится путем регулировки высоты H кармана с помощью подпружиненных винтов в диапазоне от H_{\min} до H_{\max} ; при этом минимальная высота H_{\min} кармана определяется высотой максимального подъема ориентатора, при котором он находится на 0,5 мм ниже края кольцевого паза, что исключает заклинивания заготовок при заходе на ориентатор, а максимальная высота H_{\max} – максимально возможным сжатием пружин подпружиненных винтов, что позволяет обеспечить удержание в карманах заготовок, запавших закрытым основанием вниз, и выпадение из карманов обратно в бункер заготовок, запавших открытым основанием вниз. При этом с целью исключения заклиниваний заготовок при их переходе с кольца на регулируемый ориентатор уровень начального расположения ориентатора по высоте находится на 0,5 мм ниже края кольцевого паза (рис. 5).

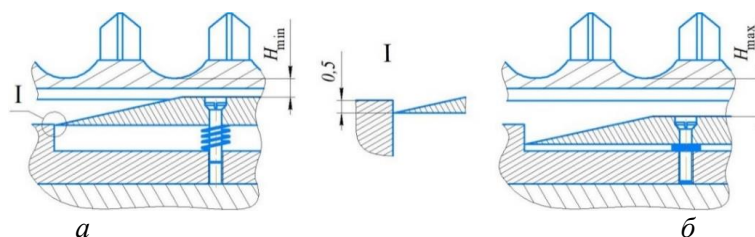


Рис. 5. Принцип функционирования регулируемого ориентатора в универсальном БЗУ при минимальной (а) и максимальной (б) высоте кармана

При проектировании предложенного БЗУ необходимо, чтобы его захватывающие и ориентирующие органы способствовали повышению вероятности захвата заготовок в правильном положении (дном вниз), удержанию в карманах таких заготовок в верхней части бункера БЗУ, выпадению из карманов заготовок, запавших в карман в неправильном положении (открытой частью). Это все в совокупности обеспечит надежное функционирование БЗУ [11, 12]. Для повышения его производительности необходимо увеличить вероятность захвата заготовок карманом, что обеспечивается наличием на поверхности вращающегося диска БЗУ радиальных пазов, ворошащих заготовки зубьев, расположенных на периферии диска между карманами, и оптимально подобранными размерами карманов, при которых в них не сможет запасть другая заготовка. Диапазоны допустимых значений геометрических параметров захватывающих и ориентирующих органов БЗУ и результаты их математического моделирования позволят выбрать их оптимальные конструктивные значения.

Так как в БЗУ функции захвата и ориентирования осуществляются в процессе диска с захватывающими органами, то для обеспечения указанных процессов необходимо также определить граничные значения окружной скорости захватывающих органов по захвату [13] и ориентированию [14]. Первая из указанных задач решается в рамках построения математических моделей вероятности захвата, а вторая – при определении граничных условий процесса ориентирования заготовок путем численного решения дифференциальных уравнений их движения.

Таким образом, для обеспечения надежного функционирования универсальной конструкции БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок в форме колпачка необходимо в дальнейшем разработать математические модели, позволяющие определить диапазоны рабочих значений конструктивных и кинематических параметров органов захвата и ориентирования БЗУ.

Список литературы

- 1 Пистолетные и снайперские патроны. Гранатометные выстрелы : учебное пособие / В. К. Зеленко, А. В. Брызжев, В. В. Злобин, В. М. Королев. – Тула : Инфра, 2008. – 120 с.
- 2 **Агеев, Н. П.** Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов / Н. П. Агеев, Г. А. Данилин, В. П. Огородников. – Санкт-Петербург : БГТУ, 2005. – 352 с. – ISBN 5-85546-170-X.
- 3 **Данилин, Г. А.** Основы проектирования патронов к стрелковому оружию / Г. А. Данилин, В. П. Огородников, А. Б. Заволокин. – Санкт-Петербург : БГТУ, 2005. – 374 с. – ISBN 5-85546-139-4.
- 4 **Прейс, В. В.** Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий / В. В. Прейс // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 10. – С. 17–22. – ISSN 0202-3350.
- 5 **Дьякова, Э. В.** Модели систем автоматической загрузки штучных деталей на базе механических дисковых бункерных загрузочных устройств / Э. В. Дьякова, Е. В. Пантюхина // Автоматизация : проблемы, идеи, решения : сборник научных трудов национальной научно-технической конференции «АПИР–26». – 2021. – С. 60–66. – ISBN 978-5-7679-3660-1.
- 6 **Давыдова, Е. В.** Теоретические основы проектирования дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором / Е. В. Давыдова, В. В. Прейс //

References

- 1 Pistol and sniper cartridges. Grenade launcher shorts : a textbook / V. K. Zelenko, A. V. Bryzhev, V. V. Zlobin, V. M. Korolev. – Tula : Infra, 2008. – 120 p.
- 2 **Ageev, N. P.** Technology for the production of small arms cartridges. Ch.1. Technological basis of cartridge design / N. P. Ageev, G. A. Danilin, V. P. Ogorodnikov. – Saint Petersburg : BSTU, 2005. – 352 p. – ISBN 5-85546-170-X.
- 3 **Danilin, G. A.** Basics of designing small arms cartridges / G. A. Danilin, V. P. Ogorodnikov, A. B. Zavolokin. – Saint Petersburg : BSTU, 2005. – 374 p. – ISBN 5-85546-139-4.
- 4 **Preis, V. V.** Reliability of automatic rotary conveyor lines for the assembly of multi-element products / V. V. Preis // Assembly in mechanical engineering, instrument engineering. – 2003. – No. 10. – P. 17–22. – ISSN 0202-3350.
- 5 **Dyakova, E. V.** Models of automatic loading systems for piece parts based on mechanical disk hopper loading devices / E. V. Dyakova, E. V. Pantyukhina // Automation : problems, ideas, solutions : collection of scientific works of the national scientific and technical conference "APIS-26." – 2021. – P. 60–66. – ISBN 978-5-7679-3660-1.
- 6 **Davydova, E. V.** Theoretical foundations of the design of a disk toothed hopper loading device with a ring orientator / E. V. Davydova, V. V. Preis // Assembly in mechanical engineering, instrument

- Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2013. – № 7. – С. 8–14. – ISSN 0202-3350.
- 7 **Пузиков, И. В.** Автоматическая загрузка плоских и близких к равноразмерным асимметричных деталей в технологические машины и линии / И. В. Пузиков, Е. В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 10. – С. 513–522. – ISSN 2071-6168.
- 8 **Давыдова, Е. В.** Автоматическая загрузка стержневых предметов обработки с неявно выраженной асимметрией по торцам / Е. В. Давыдова, В. В. Прейс. – Тула : ТулГУ, 2009. – 112 с. – ISBN 978-5-7679-1538-5.
- 9 **Пантюхина, Е. В.** Механические бункерные загрузочные устройства для элементов патронов стрелкового оружия с неявной асимметрией / Е. В. Пантюхина, В. В. Прейс // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : труды XII общероссийской научно-практической конференции : в 3 т. Сер. «Библиотека журнала “Военмех. Вестник БГТУ”». – Санкт-Петербург, 2020. – С. 79–85. – ISBN 978-5-94652-656-2.
- 10 **Патент 216181 РФ Российская Федерация, МПК В23Q 7/02.** Бункерное загрузочно-ориентирующее устройство для объемных заготовок с асимметрией по торцам / В. В. Прейс, Е. В. Пантюхина, Э. В. Дьякова. – № 2023108057 ; заявл. 30.03.2023 ; опубл. 23.10.2023, Бюл. № 30.
- 11 **Васин, С. А.** Разработка конструктивных ограничений на параметры усовершенствованных дисковых бункерных загрузочных устройств для деталей с неявной асимметрией / С. А. Васин, Е. В. Пантюхина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 146–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_146.
- 12 **Пантюхина, Е. В.** Математическое моделирование геометрических параметров органов захвата и ориентирования дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и кольцевым ориентатором / Е. В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 141–144. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-141-142.
- 13 **Васин, С. А.** Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах / С. А. Васин, Е. В. Пантюхина // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2023. – № 3. – С. 64–88. – DOI 10.18698/0236-3941-2023-3-64-88.
- engineering. – 2013. – No. 7. – P. 8–14. – ISSN 0202-3350.
- 7 **Puzikov, I. V.** Automatic loading of flat and asymmetric parts close to equal size into technological machines and lines / I. V. Puzikov, E. V. Pantyukhina // The Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2019. – No. 10. – P. 513–522. – ISSN 2071-6168.
- 8 **Davydova, E. V.** Automatic loading of core processing objects with implicit asymmetry at the ends / E. V. Davydova, V. V. Preis. – Tula : TulSU, 2009. – 112 p. – ISBN 978-5-7679-1538-5.
- 9 **Pantyukhina, E. V.** Mechanical hopper loading devices for small arms cartridge elements with implicit asymmetry / E. V. Pantyukhina, V. V. Preis // Innovative technologies and special-purpose equipment : Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference : in 3 vols. Ser. "Library of the journal "Voenmekh. Bulletin of BSTU"" – Saint Petersburg, 2020. – P. 79–85. – ISBN 978-5-94652-656-2.
- 10 **Patent 216181 Russian Federation, IPC B23Q 7/02.** Hopper loading and orienting device for bulk blanks with asymmetry at the ends / V. V. Preis, E. V. Pantyukhina, E. V. Dyakova. – No. 2023108057 ; appl. 30.03.2023 ; publ. 23.10.2023, Bull. No. 30.
- 11 **Vasin, S. A.** Development of design constraints on the parameters of improved disk hopper loading devices for parts with implicit asymmetry / S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 146–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_146.
- 12 **Pantyukhina, E. V.** Mathematical modeling of geometric parameters of the gripping and orienting organs of a disk hopper loading device with teeth and a ring orientator / E. V. Pantyukhina // The Proceedings of the Tula State University. Technical sciences. – 2023. – No. 7. – P. 141–144. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-141-142.
- 13 **Vasin, S. A.** Methodology for determining probability of capturing the asymmetric parts with the rotation body shape in disk hopper loading and orienting devices / S. A. Vasin, E. V. Pantyukhin // Bulletin of the Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Ser. Mechanical Engineering. – 2023. – No. 3. – P. 64–88. – DOI 10.18698/0236-3941-2023-3-64-88.

14 **Пантюхина, Е. В.** Обеспечение надежного ориентирования асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах / Е. В. Пантюхина, С. А. Васин, О. В. Пантюхин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 132–142. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142.

14 **Pantyukhina, E.V.** Ensuring reliable orientation of asymmetric parts with the rotation body shape in disk hopper loading and orienting devices / E. V. Pantyukhina, S. A. Vasin, O. V. Pantyukhin // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2024. – Т. 22, No 1. – P. 132–142. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142.

E. V. Pantyukhina, S. A. Lukin, S. A. Vasin

DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL DESIGN OF A MECHANICAL DISK HOPPER LOADING DEVICE WITH TEETH AND AN ADJUSTABLE ORIENTATOR FOR BLANKS OF BODIES OF REVOLUTION IN THE FORM OF A CAP

Abstract. The traditional technology and main stages of cartridge manufacturing are considered. The study shows the necessity of using automatic loading systems with mechanical disk hopper loading devices for feeding with the required productivity and high reliability into automatic machines and cartridge production lines of piece blanks and finished products having the shape of bodies of revolution. A universal design of a mechanical disk hopper loading device with teeth and an adjustable orientator for blanks of bodies of revolution in the shape of a cap is presented. The operating principle and adjustment features of the proposed universal design when orienting blanks in the shape of a cap having different ratios of geometric parameters are considered.

Keywords: automatic loading systems, blanks orientation, hopper loading device, cartridge production.

For citation: Pantyukhina, E. V. Development of a universal design of a mechanical disk hopper loading device with teeth and an adjustable orientator for blanks of bodies of revolution in the form of a cap / E. V. Pantyukhina, S. A. Lukin, S. A. Vasin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 3. – P. 43–49. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_43.

Сведения об авторах

Пантюхина Елена Викторовна

Тульский государственный университет (ТулГУ),
кафедра «Промышленная автоматика
и робототехника»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: e.v.pant@mail.ru

Лукин Сергей Анатольевич

Генеральный директор завода,
e-mail: tpz@tulammo.ru

Васин Сергей Александрович

Тульский государственный университет (ТулГУ),
кафедра городского строительства, архитектуры и
дизайна,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: vasin_sa53@mail.ru

Information about the authors

Pantyukhina Elena Viktorovna

Tula State University (TulSU),
Chair «Industrial Automation and Robotics»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: e.v.pant@mail.ru

Lukin Sergey Anatolyevich

General Director,
e-mail: tpz@tulammo.ru

Vasin Sergey Alexandrovich

Tula State University (TulSU),
Chair of Urban Development, Architecture
and Design,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: vasin_sa53@mail.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 004.42

DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_50

*М. Н. Чепцов, С. Д. Сони́на, М. Ю. Ястримский***МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОДА ПО ПАРАМЕТРАМ МОДЕЛИ
НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Аннотация. В статье предложен метод генерации программного кода на основе параметров модели нейронной сети. Обоснована необходимость разработки данного метода для повышения быстродействия программного обеспечения и расширения возможностей интеграции в системы с ограниченными аппаратными ресурсами. Рассмотрен процесс синтеза программного обеспечения, включающий создание кода прямого прохода нейронной сети, основанного на параметрах ее модели. Приведены примеры реализации кода для различных конфигураций нейронных сетей, включая сети с одним и несколькими выходами. Результаты показывают возможность уменьшения временных и ресурсных затрат при выполнении расчетов в нейронных сетях, что позволяет эффективно использовать низкопроизводительное оборудование для выполнения задач на основе нейронных сетей, что снижает затраты на оборудование. Сгенерированный код может быть легко интегрирован в различные системы, включая те, которые имеют ограниченные аппаратные ресурсы. Методология позволяет адаптировать и масштабировать решения под конкретные задачи и требования, что особенно важно для прикладных задач в областях, таких как обработка изображений и видео, распознавание речи и текстов, анализ данных и прогнозирование.

Ключевые слова: нейронная сеть, программное обеспечение, оптимизация работы, скорость функционирования.

Для цитирования: Чепцов, М. Н. Метод генерации программного кода по параметрам модели нейронной сети / М. Н. Чепцов, С. Д. Сони́на, М. Ю. Ястримский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 50–55. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_50.

Введение

Теория и практика нейросетевого моделирования является одной из наиболее активно развивающихся областей искусственного интеллекта. В настоящее время существует значительное количество программных продуктов, реализующих всевозможные направления моделирования нейронных сетей различных типов и имеющих различные архитектуры. Основными разновидностями нейронных сетей являются: перцептрон, сети прямого распространения, рекуррентные сети, сверточные сети. Разные виды сетей имеют подвиды, которые отличаются архитектурой. Существующие сегодня библиотеки и фреймворки позволяют создавать как нейронные сети для решения таких часто встречающихся на практике прикладных задач, как, например, обработка изображений и видео, распознавание речи, обработка текстов, так и другие, решающие более фундаментальные задачи в узконаправленных областях, как анализ данных и прогнозирование. Популярными библиотеками и фреймворками для создания и работы с нейросетями являются Torch [1], TensorFlow [2], Theano и Keras [3].

Целью работы является разработка метода генерации программного кода по параметрам модели нейронной сети для повышения скорости функционирования и расширения возможностей интеграции в системы с ограниченными аппаратными средствами. Это достигается путем выделения кода реализации прямого прохода нейронной сети в отдельную подпрограмму, что позволяет отказаться от библиотечных модулей и снизить требования к аппаратной части системы, не ухудшая ее функциональные возможности.

Основная часть

Как известно [4], в моделях нейронных сетей применяется как прямой проход, так и обратный. В первом случае выполняются расчеты, начиная с входных значений, нейронов первого слоя и последующих, в конечном итоге – к получению значения выходов. Во втором – для организации

процесса обучения по методу обратного распространения ошибки, в ходе которого рассчитываются значения весовых коэффициентов [4].

Следует отметить, что в большинстве случаев временные и ресурсные затраты на процесс обучения нейронной сети значительно превышают эти показатели при расчетах для прямого прохода. В первую очередь это относится к современным методам, таким как глубокое обучение (Deep Learning) [4–6], обучение больших языковых моделей (LLM) [7] и других. В то же время требования к производительности систем, в задачи которых входит только применение прямого прохода заранее обученной нейронной сети, значительно ниже. Однако и в этом случае существует ряд задач, которые требуют решения.

Так, одним из приоритетных является вопрос повышения быстродействия программного обеспечения системы. Его решение позволит снизить требования к аппаратной части системы, не ухудшая ее функциональные возможности. Кроме этого, выделение кода реализации прямого прохода нейронной сети в отдельную подпрограмму позволит отказаться от библиотечных модулей, необходимых для обеспечения функциональности большинства пакетов прикладных программ. Таким образом существует необходимость в разработке метода генерации программного кода по параметрам модели нейронной сети с целью повышения скорости функционирования и расширения возможностей интеграции в системы с ограниченными аппаратными средствами.

Функциональность нейронной сети определяется значениями параметров ее модели [4]. Рассмотрим нейронную сеть минимальной конфигурации, состоящую из трех нейронов (N_{00}, N_{01}, N_{10}); шести весовых коэффициентов ($w_{000}, w_{001}, w_{010}, w_{011}, w_{100}, w_{101}$); двух входов (X_0, X_1) и одного выхода (Y_0). В качестве функции возбуждения нейронов принимаем гиперболический тангенс $th(x)$ с соответствующими значениями наклона (S_{00}, S_{01}, S_{10}) (рис. 1).

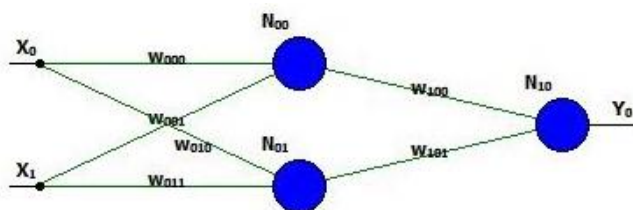


Рис. 1. Схема нейросетевой модели с тремя нейронами

В этом случае расчетная формула вычисления значения выхода (Y_0) при подаче на входы значений (X_0, X_1) в модели (рис. 1) производится в соответствии со следующим выражением [5]:

$$Y_0 = th(S_{10} \cdot (1 + th(S_{00} \cdot (1 + w_{000} \cdot X_0 + w_{000} \cdot X_1)/2) \cdot w_{100} + th(S_{01} \cdot (1 + w_{010} \cdot X_0 + w_{011} \cdot X_1)/2) \cdot w_{101})/2 \quad (1)$$

Следует отметить, что вид выражения (1) однозначно зависит от структуры нейронной сети, а количество таких выражений определяется числом ее выходов. Данный факт является определяющим для возможности создания алгоритма синтеза программного обеспечения функционирования НС при прямом проходе. Для сети с одним выходом подпрограмма, генерирующая программный код прямого прохода НС на языке С++ будет выглядеть следующим образом (рис. 2).

```
QStringList res;
for(int c_l=0;c_l<NET_LAYERS;c_l++){
  for(int n=0;n<a_l[c_l].size();n++){
    Neuron *nn = &a_l[c_l][n];
    QString tmp = QString("tanh(%1*(%2)).arg(slope).arg(bias)");
    for(int nw=0;nw<a_w.size();nw++){
      if(c_l==0) tmp+=QString("+X[%1]*(%2)").arg(nw).arg(a_w[nw].w);
      else tmp+=QString("+(%1)*(%2)").arg(res[nw]).arg(a_w[nw].w);
    }
    tmp += ")/2.0)";
    res << tmp;
  }
}
```

Рис. 2. Фрагмент программы формирования исходного кода функционирования нейросетевой модели

В исходном коде на рис. 2 NET_LAYERS – количество слоев нейронной сети; a_1 – массив слоев; a_w – массив весовых коэффициентов текущего нейрона nn; slope – значение наклона функции возбуждения; bias – значение смещения нейрона. Результатом работы данного фрагмента ПО является строка, содержащая расчетную формулу для одного выхода НС и произвольного количества входов, слоев и нейронов. Так, для примера нейронной сети, состоящей из 3-х нейронов, с рассчитанными в процессе обучения весовыми коэффициентами и значениями наклона функции возбуждения, приведенного в работе [10], сгенерированный код примет следующий вид (рис. 3).

$$Y = \tanh(-8.60881*(1+(\tanh(-0.0567689*(1+X[0]*(-292.084)+X[1]*(290.561))/2.0))*(-1228.29)+(\tanh(-0.0527948*(1+X[0]*(0.376235)+X[1]*(0.435579))/2.0))*(-1228.28))/2.0)$$

Рис. 3. Сгенерированный исходный код нейросетевой модели, приведенной в работе [6]

В коде (рис. 3) $\tanh(\text{alg})$ – функция стандартной библиотеки (cmath или math.h) которая вычисляет значение гиперболического тангенса аргумента alg; Y – выход НС; X[0], X[1] – первый и второй входы соответственно.

Полный сгенерированный код библиотеки, предназначенной для решения задачи, рассмотренной в работе [10], имеет следующий вид (рис. 4).

```
#include <math.h>
extern "C" __declspec(dllexport) double __cdecl neuro_lib_stat(const
double* X) {
return tanh(-8.60881*(1+(\tanh(-0.0567689*(1+X[0]*(-
292.084)+X[1]*(290.561))/2.0))*(-1228.29)+(\tanh(-
0.0527948*(1+X[0]*(0.376235)+X[1]*(0.435579))/2.0))*(-1228.28))/2.0);
}
```

Рис. 4. Сгенерированный исходный код библиотеки для модели, приведенной в работе [8]

Программный код (рис. 2) также применяется в качестве подпрограммы для нейронных сетей с количеством выходов больше одного. Он оформляется в виде функции и вызывается в цикле по количеству выходов. Так, например, для нейронной сети (рис. 5) со случайными значениями весовых коэффициентов и наклона функции возбуждения сгенерированный программный код прямого прохода представлен на рис. 6.

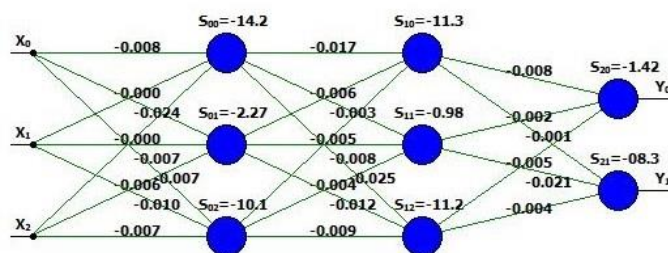


Рис. 5. Схема нейросетевой модели, состоящей из трех слоев, трех входов и двух выходов

```
vector<double> run(const vector<double> &X) {
vector<double> Y;
for(size_t i=0;i<X.size();i+=3){
Y.push_back(tanh(-1.41613*(1+(\tanh(-14.2324*(1+X[i+0]*(-
0.0084417)+X[i+1]*(-0.00032896)+X[i+2]*(-0.000431855))/2.0))*(-
0.00843607)+(\tanh(-2.27181*(1+X[i+0]*(-0.0244442)+X[i+1]*(-
0.00726832)+X[i+2]*(-0.00573607))/2.0))*(-0.00168619)+(\tanh(-
10.0785*(1+X[i+0]*(-0.00692646)+input[i+1]*(-0.0102324)+input[i+2]*(-
0.00661238))/2.0))*(-0.00454837))/2.0));
Y.push_back(tanh(-8.29711*(1+(\tanh(-14.2324*(1+X[i+0]*(-
0.0084417)+X[i+1]*(-0.00032896)+X[i+2]*(-0.000431855))/2.0))*(-
0.00116554)+(\tanh(-2.27181*(1+X[i+0]*(-0.0244442)+X[i+1]*(-
0.00726832)+X[i+2]*(-0.00573607))/2.0))*(-0.0205153)+(\tanh(-
10.0785*(1+X[i+0]*(-0.00692646)+X[i+1]*(-0.0102324)+X[i+2]*(-
0.00661238))/2.0))*(-0.00421124))/2.0));
}
return Y;
}
```

Рис. 6. Сгенерированный программный код для модели (рис. 5)

Функция `run` (рис. 6) возвращает вектор, где $Y[0]$ и $Y[1]$ – выходы НС, Y_0 и Y_1 соответственно (рис. 5). Вектор входных параметров $X[0]$, $X[1]$, $X[2]$ соответствуют (X_0, X_1, X_2) модели на рис. 5.

Результаты экспериментов

Оценим время выполнения сгенерированного программного кода нейросетевой модели в сравнении с наиболее распространенными библиотеками TensorFlow и PyTorch. Выберем НС минимальной конфигурации (рис. 1) с сигмоидальной функцией возбуждения нейронов и обучим ее для решения классической задачи «XOR». Оценку времени производим для прямого прохода нейронной сети (feedforward), как с предварительно инициализированными параметрами и выводом на консоль результатов расчетов, так и только для вызова расчетной функции (таблица).

Результаты экспериментов по оценке и сравнению времени выполнения программного кода нейросетевой модели

№ п/п	Библиотека/язык	Время выполнения нейронной сети (мкс)		Результаты расчета ([0.0,1.0,1.0,0.0] при нулевой погрешности)
		включая инициализацию модели и вывод результатов	только вызов расчетной функции	
1	Tensorflow/python	46984,0	15657,0	[0.003486,0.99772,0.99985,0.000362]
2	PyTorch/python	81,316	10,297	[0.00106,0.99854,0.99902,0.0009194]
3	Код/python	3,8041	2,1632	[0.0,0.999072,0.9997175,0.0]
4	Код/C++ (exe)	0,29186	0,25981	[0.0,0.999072,0.9997175,0.0]

Так как время выполнения расчетной функции достаточно маленькое, в программном коде ее выполнение осуществляется в цикле, а результат измерения делится на количество итераций. В результате получены экспериментальные данные, которые подтверждают предположение о существенном увеличении скорости расчетов для прямого прохода нейронной сети при применении рассматриваемого в работе подхода.

Выводы

На примере нейронной сети минимальной конфигурации разработан метод генерации программного кода на основе параметров модели нейронной сети. Новизна работы заключалась в повышении скорости функционирования программного обеспечения и расширении его возможностей интеграции в системы с ограниченными аппаратными средствами. Для этого был выделен код реализации прямого прохода нейронной сети в отдельную подпрограмму, что позволило снизить требования к аппаратной части системы без ущерба для ее функциональности.

Проведенное тестирование показало, что разработанный метод позволяет эффективно генерировать код для нейронных сетей с различной архитектурой, включая сети с произвольным количеством входов, выходов, слоев и нейронов. Преимуществом является возможность использования менее мощного оборудования, что снижает затраты на его приобретение и обслуживание. Кроме того, метод позволяет адаптировать и масштабировать решения под конкретные задачи, что особенно важно для применения в областях, требующих обработки больших объемов данных, таких как анализ изображений, распознавание речи и прогнозирование.

Список литературы

1 Программные среды для изучения основ нейронных сетей / П. Ю. Богданов, Е. В. Краева, С. А. Веревкин [и др.] // Программные продукты и системы. – 2021. – Т. 34. – № 1. – С. 145–150. – DOI 10.15827/0236-235X.133.145-150.

References

1 Software environments for studying the basics of neural networks / P. Yu. Bogdanov, E. V. Kraeva, S. A. Verevkin [et al.] // Software products and systems. – 2021. – Vol. 34. – No. 1. – P. 145–150. – DOI 10.15827/0236-235X.133.145-150.

2 **Стивенс, Э.** PyTorch. Освещающая глубокое обучение : профессиональная литература / Э. Стивенс, Т. Виман, Л. Антига. – Санкт-Петербург : Питер, 2022. – 576 с. – (Серия «Библиотека программиста»). – ISBN 978-5-4461-1945-5.

3 TensorFlow : LargeScale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems / M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham [et al.] // arXiv preprint arXiv 1603.04467, 2016. – DOI 10.48550/arXiv.1603.04467.

4 **Wu, J.** (2018). A Comparative Measurement Study of Deep Learning as a Service Framework. IEEE Transactions on Services Computing / J. Wu, Z. Zhang, C. Hsieh // arXiv preprint. – 2022. – Vol. 15. – No. 1. – P. 551–566. – DOI 10.1109 / TSC.2019.2928551.

5 **Хайкин, С.** Нейронные сети : полный курс. Пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд., испр. – Москва : ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 1104 с. – ISBN 5-8459-0890-6.

6 Ускорение прямого прохода при реализации СНС на ограниченном вычислительном ресурсе / А. Е. Щелкунов, В. В. Ковалев, И. В. Сидько, Н. Е. Сергеев // Известия ЮФУ. Технические науки. – № 1 (225). – 2022. – С. 289–297. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-289-297.

7 Review of deep learning : concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions / L. Alzubaidi, J. Zhang, A. J. Humaidi [et al.] // J Big Data 8, 53 (2021). – URL : <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8> (date of access: 04/09/2024).

8 **Sarker, I. H.** Deep Learning : A Comprehensive Overview on Techniques, Taxonomy, Applications and Research Directions / I. Sarker. – SN COMPUT. SCI. 2, 420 (2021). – URL: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00815-1> (date of access: 04/09/2024).

9 Evaluation of pre-training large language models on leadership-class supercomputers / J. Yin, S. Dash, J. Gounley [et al.] // J Supercomput 79, 20747–20768 (2023). – URL : <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05479-7> (date of access: 04/09/2024).

10 **Чепцов, М. Н.** Нейросетевой компаратор действительных чисел / М. Н. Чепцов, С. Д. Сонина // Сборник научных статей ДОНИЖТ. – Выпуск 67. – 2022. – С. 11–15. – ISSN 1993-5579.

2 **Stevens, E.** PyTorch. Covering deep learning : professional literature / E. Stevens, T. Wiman, L. Antiga. – Saint-Petersburg : Peter, 2022. – 576 p. – (Series "Programmer's Library"). – ISBN 978-5-4461-1945-5.

3 TensorFlow : LargeScale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems / M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham [et al.] // arXiv preprint arXiv 1603.04467, 2016. – DOI 10.48550/arXiv.1603.04467.

4 **Wu, J.** (2018). A Comparative Measurement Study of Deep Learning as a Service Framework. IEEE Transactions on Services Computing / J. Wu, Z. Zhang, C. Hsieh // arXiv preprint. – 2022. – Vol. 15. – No. 1. – P. 551–566. – DOI 10.1109 / TSC.2019.2928551.

5 **Haikin, S.** Neural networks : a complete course. Translated from English / S. Haikin. – 2nd ed., rev. – Moscow : "I. D. Williams" LLC, 2006. – 1104 p. – ISBN 5-8459-0890-6.

6 Acceleration of the direct passage in the implementation of CNN on a limited computing resource / A. E. Shchelkunov, V. V. Kovalev, I. V. Sidko, N. E. Sergeev // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. – No. 1 (225). – 2022. – P.289–297. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-289-297.

7 Review of deep learning : concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions / L. Alzubaidi, J. Zhang, A. J. Humaidi [et al.] // J Big Data 8, 53 (2021). – URL : <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8> (date of access: 04/09/2024).

8 **Sarker, I. H.** Deep Learning : A Comprehensive Overview on Techniques, Taxonomy, Applications and Research Directions / I. Sarker. – SN COMPUT. SCI. 2, 420 (2021). – URL: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00815-1> (date of access: 04/09/2024).

9 Evaluation of pre-training large language models on leadership-class supercomputers / J. Yin, S. Dash, J. Gounley [et al.] // J Supercomput 79, 20747–20768 (2023). – URL : <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05479-7> (date of access: 04/09/2024).

10 **Cheptsov, M. N.** Neural network comparator of real numbers / M. N. Cheptsov, S. D. Sonina // Collection of scientific articles by DONIZHT. – Issue 67. – 2022. – P. 11–15. – ISSN 1993-5579.

M. N. Cheptsov, S. D. Sonina, M. Yu. Yastrimskiy

A METHOD FOR GENERATING PROGRAM CODE BASED ON THE PARAMETERS OF A NEURAL NETWORK MODEL

Abstract. The article proposes a method for generating program code based on the parameters of a neural network model. The necessity of developing this method to improve the performance of software and expand the possibilities of integration into systems with limited hardware resources is justified. The process of software synthesis is considered, including the creation of a direct pass code of a neural network based on the parameters of its model. Examples of code implementation for various configurations of neural networks, including networks with one and several outputs, are given. The results show the possibility of reducing time and resource costs when performing calculations in neural networks, which makes it possible to effectively use low-performance equipment to perform tasks based on neural networks, which reduces equipment costs. The generated code can be easily integrated into various systems, including those with limited hardware resources. The methodology allows you to adapt and scale solutions to specific tasks and requirements, which is especially important for applied tasks in areas such as image and video processing, speech and text recognition, data analysis and forecasting.

Keywords: neural network, software, optimization of operation, speed of functioning.

For citation: A method for generating program code based on the parameters of a neural network model / M. N. Cheptsov, S. D. Sonina, M. Yu. Yastrimskiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 50–55. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_50.

Сведения об авторах

Чепцов Михаил Николаевич

Донецкий институт железнодорожного транспорта,
кафедра «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: m.cheptsov@yandex.com

Сонина Светлана Дмитриевна

Донецкий институт железнодорожного транспорта,
кафедра «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника»,
старший преподаватель,
e-mail: soninadonigt@yandex.com

Ястримский Максим Юрьевич

Донецкий институт железнодорожного транспорта,
кафедра «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника»,
магистрант,
e-mail: maksim.yastrimskiy@gmail.com

Information about the authors

Cheptsov Mikhail Nikolaevich

Donetsk Institute of Railway Transport,
Chair «Automation, telemechanics,
communications and computer engineering»,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: m.cheptsov@yandex.com

Sonina Svetlana Dmitrievna

Donetsk Institute of Railway Transport,
Chair «Automation, telemechanics,
communications and computer engineering»,
Senior Lecturer,
e-mail: soninadonigt@yandex.com

Yastrimskiy Maxim Yurievich

Donetsk Institute of Railway Transport,
Chair «Automation, telemechanics,
communications and computer engineering»,
Graduate Student,
e-mail: maksim.yastrimskiy@gmail.com

В. В. Штанке

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ПРИ ПРОХОДЕ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена внедрением единой системы управления движением поездов на магистральных железных дорогах, основанной на микропроцессорных технологиях [1]. Значительная роль в системах технической диагностики тягового подвижного состава отводится путевым датчикам. Научно-внедренческий центр «Безопасность транспорта» (НВЦ БТ) Ростовского государственного университета путей сообщения провел исследование параметров сигнала, получаемого при проходе колеса над магнитоиндукционными датчиками; новые конструкции датчиков и метод обработки их сигналов позволяют не только считать оси, но и выявлять дефекты колес.

Анализ сигналов, модулируемых магнитоиндукционным датчиком при проходе над ним колесной пары подвижного состава, благодаря современным аппаратно-программным комплексам и возможностям графического представления данных может отражать реальную картину состояния профиля колесных пар проходящего поезда, а также позволяет определить перекосы тележки, наличие волокущихся деталей, критично-перегретые буксы. В статье представлен графико-цифровой метод обработки сигнала для получения диагностической информации мониторинга состояния колес подвижного состава железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: датчик магнитоиндукционный, параметры сигналов, детерминированные сигналы, дефекты колесной пары, алгоритм фиксации дефектов, имитация помех.

Для цитирования: Штанке, В. В. Методы анализа сигналов магнитоиндукционного датчика при проходе колесных пар подвижного состава / В. В. Штанке // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 56–67. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_56.

Введение

Устройства системы железнодорожной автоматики (ЖАТ), систем управления движением поездов обеспечивают безопасность и безостановочный пропуск составов и имеют высокий уровень диагностирования. Вопросы получения в автоматическом режиме с коротким периодом обработки информации от подключенных к контрольным точкам ЖАТ измерительных устройств, автоматизированный анализ поступающей информации с выдачей предупреждающих сообщений о текущем и прогнозируемом состоянии устройствами управления движением поездов сегодня решаются посредством функционального (или рабочего) контроля систем технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) [2]. Измерительно-вычислительные комплексы непрерывной диагностики устройств СТДМ ЖАТ оснащены программной обработкой поступающей информации, регистрации отказов и неисправностей, определением причин сбоев, протоколированием и обменом информацией с внешними системами. Особое внимание уделяется автоматизации анализа диагностической информации о состоянии колесных пар, счета осей направления движения и скорости подвижного состава. Магнитоиндукционные датчики как напольные модули счета осей, определения скорости и направления движения колесных пар показали свою надежность и эффективность. По конструкции датчики не требуют для работы никаких источников питания и рассчитаны на длительный срок службы [3].

В научно-внедренческом центре «Безопасность транспорта» (НВЦ БТ) Ростовского государственного университета путей сообщения разработана усовершенствованная конструкция – датчик магнитоиндукционный ШМП12 (Штанке магнитный помехоустойчивый) [4]. Новый датчик оснащен блоком формирования сигналов, обладает не только помехоустойчивостью, но и имеет расширенные функциональные возможности. В статье обсуждаются анализ и оценка выходных сигналов, модулируемых датчиком, изучение сигналов с целью определения параметров их искажения

в зависимости от дефектов колесных пар и разработка алгоритмов классификации этих дефектов в режиме реального времени.

Методы анализа аналоговых сигналов

Современные системы управления движением поездов и мониторинга устройств железнодорожной автоматики основаны на комплексах технических средств распределённых измерений, контроля и управления. Это согласованные и объединённые общим конструктивным исполнением модули промышленной автоматики. Они предназначены для измерения поступающих аналоговых величин, управления дискретными объектами и передачи информации на компьютеры (контроллеры) через стандартный интерфейс RS-485 [5]. Принцип работы системы технического диагностирования микропроцессорных систем управления движением поездов (СТД-МПК) основан на периодическом измерении и обработке аналоговой информации. Фиксируемые величины в системе СТД-МПК при периодическом измерении образуют упорядоченную последовательность значений – временной ряд сигналов $s = [s^{(1)} \dots s^{(n)}]$, который представлен на рис. 1.

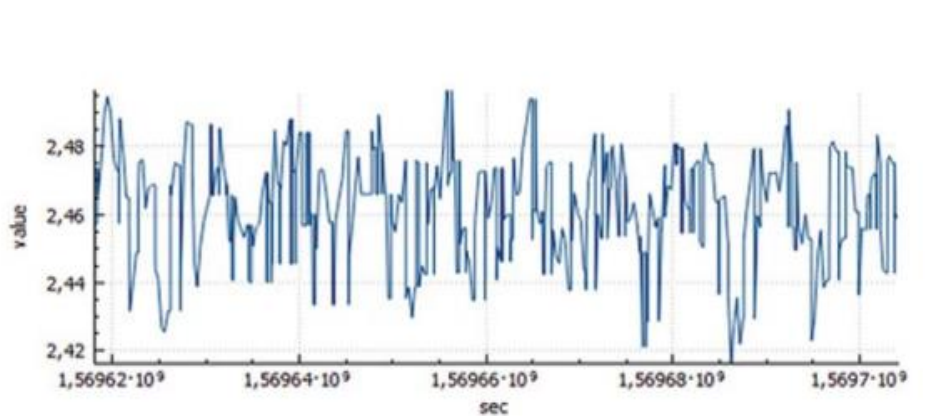


Рис. 1. Временной ряд изменений напряжения, фиксируемый системой СТД-МПК [4]

Методы обработки аналого-цифровых сигналов – это частотно-временное разложение сигнала на кратковременные преобразования Фурье и более глубокие частотные вейвлет-преобразования [6,7].

Применяя быстрое преобразование Фурье, дискретный спектр сигнала $s(m)$ -момента определяется по (1) [8]:

$$s(m) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-j2\pi mn/N}, \quad (1)$$

где $s(n)$ – дискретная последовательность значений сигнала в области непрерывного сигнала $s(t)$.

Интегрируя (вейвлет-преобразуя) по частоте временной ряд, $s(t)$ получаем в виде (2) [9]:

$$s(t_i) = \sum_{k=1}^{2N-M} a_{mk} \varphi_{mk}(t_i) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{2N-M} d_{mk} \psi_{mk}(t_i), \quad (2)$$

где M – число уровней разложения;

a_{mk} , d_{mk} – коэффициенты разложения;

ψ_{mk} , φ_{mk} – локальность функции.

Используя систему MATLAB [10, 11], вычислив коэффициенты Фурье и вейвлет-преобразования, для данных, полученных из системы данных СТД-МПК, строится спектрограмма для определения локальной особенности сигналов (рис. 2).

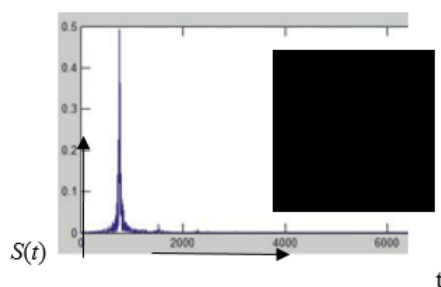


Рис. 2. Спектрограмма локальной особенности сигналов, принимаемых СТД-МПК

Анализ представленной спектрограммы наглядно показывает локальную особенность получаемого сигнала после преобразований Фурье. Этот метод, по мнению авторов [5], можно применять для построения признакового пространства диагностики неисправностей аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ).

Методика нашего исследования основана на анализе непрерывно принимаемого сигнала в течение короткого периода времени, поскольку измерения проводятся в реальном режиме. Для изучения сигналов, модулируемых датчиком, с последующим преобразованием аналоговых сигналов в цифровые и дальнейшей их обработкой рассмотрим получаемые нами сигналы (рис. 3), изучим их дискретизацию и определим величину погрешности преобразования [12].

Рассмотрим сигнал, получаемый при проходе колеса над датчиком (см. рис. 3).

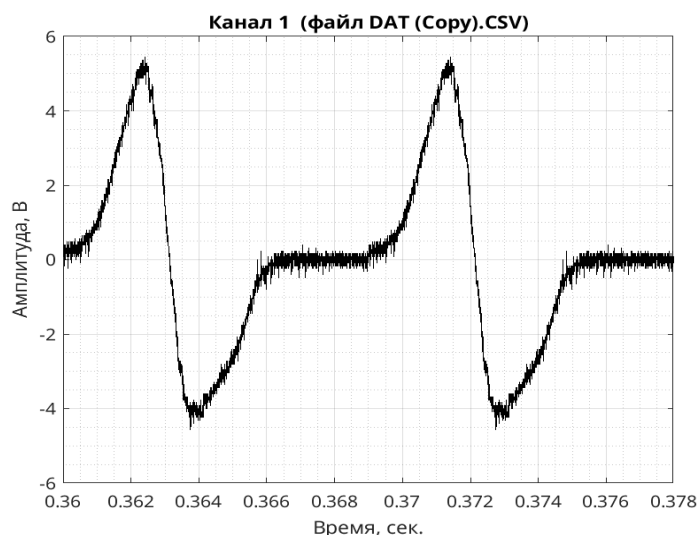


Рис. 3. Сигнал при проходе колеса над датчиком

Выразим сигнал $s(t)$, получаемый при проходе колеса над датчиком, как последовательность прямоугольных импульсов (рис. 4).

Рассматриваем сигнал, полученный от датчика после оцифровки по шести точкам значений, характеризующих состояние сигнала через определенные промежутки времени:

$$(t = 0,012c \rightarrow a = 0,2v, t = 0,016c \rightarrow a = 3,01v, t = 0,0174 \rightarrow a = 0,14v, \\ t = 0,068c \rightarrow a = 0,36v, t = 0,074 \rightarrow a = 3,01v, t = 0,078c \rightarrow a = 0,12v).$$

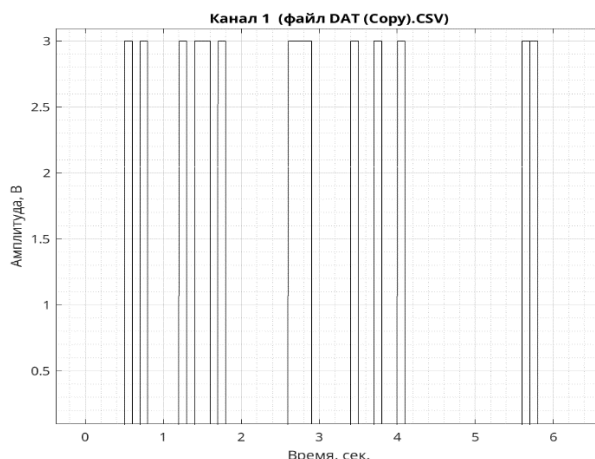


Рис. 4. Дискретный сигнал $x(nT_d)$, соответствующий выборкам аналогового сигнала $s(t)$

Для описания периодических процессов гармонических колебаний соответствующим математическим инструментом является преобразование Фурье [13]. Опишем периодическое гармоническое напряжение $u(t)$ как периодическую функцию $s(t)$ в виде ряда Фурье [14], период которой составляет $T = 0,5$ с.

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t),$$

где a_0 – постоянная составляющая сигнала:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) dt,$$

t – время сигнала;

T – период повторения сигнала;

a_n – амплитуда косинусоидальной гармоники:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega_0 n t) dt;$$

b_n – амплитуда синусоидальной гармоники:

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega_0 n t) dt,$$

$(\omega_0 n t)$ – частотная составляющая сигнала.

Временное представление периодического сигнала датчика можно выразить в тригонометрической форме [14, 15]:

$$s(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n (\cos(\omega_0 n t + \Phi_n)),$$

где $n = 1, 2;$

$$C_0 = \frac{a_0}{2};$$

$$C_n = \frac{1}{T} s(j\omega) - \text{коэффициент разложения комплексного ряда Фурье};$$

Φ_n – начальная фаза n -гармоники:

$$\Phi_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n}.$$

Для определения погрешности цифрового представления нашего аналогового периодического сигнала $s(t)$ представим оценку в виде конечной суммы N первых членов ряда, где N – число кратных по частоте гармонических колебаний [13]:

$$s_N(t) = \sum_{n=0}^N C_n (\cos(\omega_0 n t + \Phi_n)).$$

Учитывая равенство Парсевала, связывающее среднюю мощность периодического сигнала во временной и частотной областях [14],

$$P_n = \frac{2}{T} \int_0^T s^2(t) dt = \frac{A_0^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^2 + B_n^2) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n^2.$$

Чтобы обработать аналоговый сигнал цифровым способом, его преобразуют в двоичную форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [15].

Анализ непериодических сигналов $s(j\omega)$ в частотной области определяем прямым преобразованием Фурье [16–17]:

$$s(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt.$$

Обратным преобразованием Фурье восстановим сигнал по его спектральной плотности [16]:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) \cdot e^{j\omega t} \cdot dt.$$

Спектральную плотность дискретного сигнала $X_d(j\omega)$ определяем, дискретизировав по времени преобразование Фурье соответствующего аналогового сигнала [17]:

$$X_d(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt.$$

Преобразуем t на nT_d :

$$X_d(j\omega) = T_d \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(nT_d) \cdot e^{-j\omega n T_d} dt.$$

Получаемый результат можно проверить следующим алгоритмом преобразования спектральной плотности $X_d(3)$ [18, 19]:

$$X_d = \frac{(P_n \cdot 1024)}{E}, \quad (3)$$

где $E = 5B$ для аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

С помощью команд MATLAB выполним численное интегрирование, определим спектр дискретного сигнала и построим спектрограмму временного ряда полученного сигнала. При этом спектр дискретного сигнала в основной полосе частот совпадает со спектром аналогового сигнала. Дискретизация не приводит к искажениям, и аналоговый сигнал можно точно восстановить по дискретным выборкам с использованием идеального фильтра нижних частот (табл. 1).

Таблица 1

Проверка восстановления аналогового сигнала

Преобразуемое значение P_n (В)	Проверка результата АЦП X_d	Результат АЦП
0,2	40,96	40
3,01	616,448	616
0,14	28,672	28
0,36	73,728	73
3,01	616,448	616
0,12	24,576	24

На основании этих данных можно сделать следующие выводы: аналоговый сигнал восстанавливается путем аналого-цифрового преобразования с минимальной погрешностью. Последующее сравнение восстановленных сигналов с исходными показывает, что точность восстановления повышается за счет увеличения числа учитываемых гармоник.

Применив разложение в ряд Фурье, в системе MATLAB восстановим исходный амплитудный спектр сигнала датчика в цифровом виде. Проведем дискретизацию сигнала $s(t)$ (рис. 5). Полученные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Точки дискретизации сигнала

Точка дискретизации	Время (мс)	Амплитуда сигнала(В)
1	0,0000240056	0,16
2	0,0000360084	0,16
3	0,0000480112	0,16
4	0,0000600140	0,16
5	0,0000720168	0,16
6	0,0000840196	0,16
7	0,0000960224	0,16
8	0,0001080252	0,16
9	0,0001200280	0,16
10	0,0001320308	0,16
11	0,0001440336	0,24
...
7500	0,0900209999	0,16
7501	0,0900330027	0,16
7502	0,0900450055	0,16

Окончание табл. 2

7503	0,0900570083	0,16
7504	0,0900690111	0,16
7505	0,0900810139	0,16
7506	0,0900930167	0,16
7507	0,0901050195	0,16
7508	0,0901170223	0,16
7509	0,0901290251	0,24
7510	0,0901410279	0,16
7511	0,0901530307	0,32
...
14997	001800059915	0

Восстановленный амплитудный спектр сигнала $s_1(t)$ по заданным точкам дискретизации (см. рис. 5).

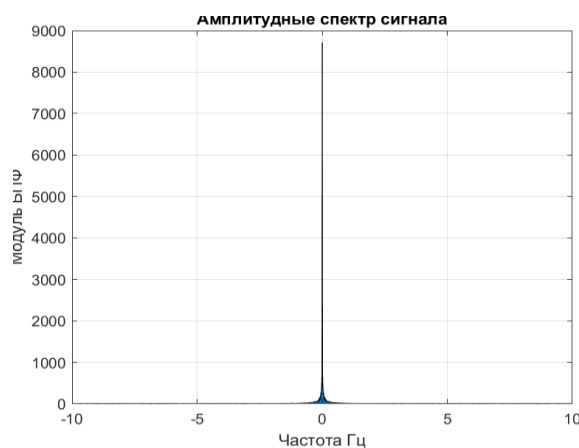


Рис. 5. Амплитудный спектр сигнала $s(t)$

После восстановления амплитудного сигнала дискретными спектрами практически без искажения можно говорить о цифровой обработке принимаемых сигналов магнитоиндукционных датчиков блоком формирования сигналов. Дальнейшие исследования позволят классифицировать искажения получаемых сигналов под определенные дефекты колесных пар, например, амплитудные всплески (табл. 3) отражают изъяны колеса на рис. 7.

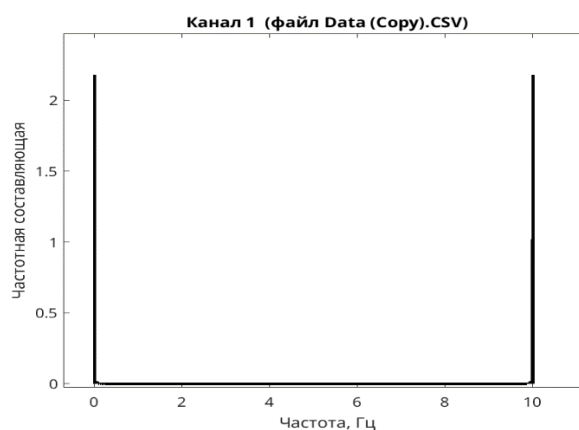


Рис. 6. Восстановленный амплитудный спектр исходного сигнала (см. рис. 3) с двумя осями

Таблица 3

Точки дискретизации сигнала искаженного сигнала

Точка дискретизации	Время (мс)	Значение амплитуды сигнала (В)
1	-0,18000	0
2	-0,17992	0
3	-0,17984	0,08
4	-0,17976	0,08
5	-0,17967	0,08
6	-0,17960	0,08
750	-0,12024	0,32
751	-0,12016	0,32
752	-0,12008	0,08
...
2143	-0,00880	-0,8
2144	-0,00871	-0,64
2145	-0,00863	-0,64
2146	-0,00856	-0,56
2147	-0,00847	-0,72
2148	-0,00840	-0,56
...

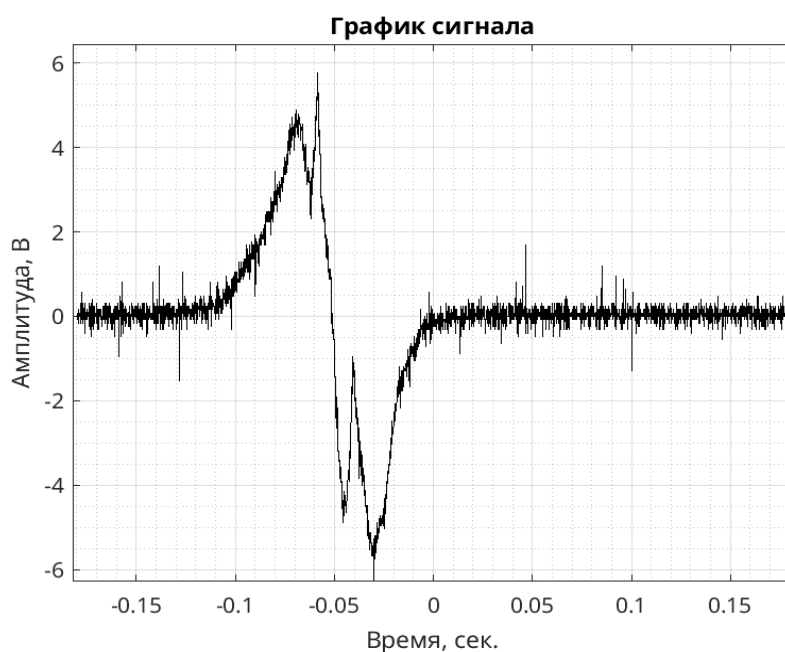


Рис. 7. График прохода колеса с изъяном (выщерблина) над магнитоиндукционным датчиком ШМП12

После проведенных исследований можно утверждать, что научно-внедренческому центру «Безопасность транспорта» Ростовского государственного университета путей сообщения удалось расширить диагностические возможности магнитоиндукционных датчиков за счет взаимодействия с дополнительным блоком формирования сигналов. Сигнал, полученный от датчиков с настроенной микропроцессорной системой, может быть обработан и применен для счета осей (ССО), КТСМ для дальнейшего анализа и интерпретации сигнала.

Это перспективная разработка, которая будет иметь важное экономическое значение для железнодорожной отрасли.

Выводы

1 Аппаратно-программное обеспечение магнитоиндукционных датчиков блоком формирования сигналов перспективно для использования в качестве подпрограммы систем железнодорожной автоматики, технической диагностики и мониторинга подвижного состава.

2 Дальнейшие исследования и создание программируемого блока формирования и оценки сигналов (БФС) [20] для определения дефектов ходовой части подвижного состава будут отработаны на практике. При обработке массива дискретных значений в соответствии с принятыми алгоритмами оцифровка сигнала сохраняет максимальную точность даже в промежуточных точках между отсчетами, поэтому, согласно комплексной оценке параметров, сигнал можно классифицировать по отклонениям в ходовой части подвижного состава, что повысит безопасность движения железнодорожного транспорта без дорогостоящего переоборудования комплексов технической диагностики.

Список литературы

1 Построение распределенных микропроцессорных систем управления движением поездов / А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, А. А. Лыков [и др.] // Автоматика на транспорте. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 153–161. – DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-02-153-161.

2 **Ефанов, Д. В.** Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2016. – 171 с. – ISBN 978-5-7641-0933-6.

3 Моделирование неисправностей магнитоиндукционных датчиков счета осей / Ю. В. Шаповалова, Ю. Е. Пустовой, А. А. Эгизян, Д. В. Швалов // Сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практич. конф. «Цифровые инфокоммуникационные технологии». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 279–283. – DOI 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_279.

4 Датчик Штанке магнитный помехоустойчивый ШМП12 : руководство по эксплуатации Ш2.00.00 РЭ. – 2014.

5 **Черезов, Г. А.** О возможности применения методов обработки сигналов в системе технического диагностирования СТД-МПК / Г. А. Черезов, Р. З. Галинуров, К. В. Колесниченко // Транспорт Урала. – 2020. – № 1 (64). – С. 35–38. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-1-35-38.

References

1 Construction of distributed microprocessor systems for train traffic control / A. B. Nikitin, O. A. Nasedkin, A. A. Lykov [et al.] // Automation in transport. – 2023. – Vol. 9, No. 2. – P. 153–161. – DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-02-153-161.

2 **Efanov, D. V.** Functional control and monitoring of railway automation and telemechanics devices : monograph / D. V. Efanov. – Saint Petersburg : PGUPS, 2016. – 171 p. – ISBN 978-5-7641-0933-6.

3 Modeling of malfunctions of magnetoinduction sensors of axis counting / Yu. V. Shapovalova, Yu. E. Pustovoy, A. A. Egizyan, D. V. Shvalov // Collection of scientific papers of II International Scientific and Practical Conference "Digital Information Technologies". – Rostov on Don : RSTU, 2022. – P. 279–283. – DOI 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_279.

4 The Shtanke magnetic noise-resistant sensor SHMP12 : operating manual Sh2.00.00 RE. – 2014.

5 **Cherezov, G. A.** On the possibility of using signal processing methods in the STD-MPK technical diagnostics system / G. A. Cherezov, R. Z. Galinurov, K. V. Kolesnichenko // Transport of the Urals. – 2020. – No. 1 (64). – P. 35–38. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-1-35-38.

6 **Бушуев, С. В.** Исследование точности измерений среднеквадратических значений электрических сигналов на ограниченных интервалах времени / С. В. Бушуев, А. Н. Попов // Транспорт Урала. – 2011. – № 2 (29). – С. 46–50. – EDN NWGZDZ.

7 **Вашкевич, М. И.** Сравнение частотно-временных преобразований: Фурье-анализ, вейвлеты и банки фильтров на основе фазового преобразования / М. И. Вашкевич, И. С. Азаров // Цифровая обработка сигналов. – № 2. – 2020. – С. 13–26. – ISSN 1684-2634.

8 **Черезов, Г. А.** Математическая постановка задачи технического диагностирования аппаратуры тональных рельсовых цепей / Г. А. Черезов, В. Б. Леушин, О. А. Кацюба // Транспортные интеллектуальные системы : сборник материалов I Международной научно-практической конференции «Транспортные интеллектуальные системы – 2017» (TIS-2017) (16–17 февраля 2017 г.) / под редакцией В. В. Сапожникова, Д. В. Ефанова. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2017. – С. 81–86. – ISBN 978-5-7641-0975-6.

9 **Черезов, Г. А.** Построение признакового пространства из коэффициентов вейвлет-преобразования / Г. А. Черезов, А. Н. Попов // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017) : труды Международной научно-технической конференции / под редакцией С. А. Прохорова. – Самара : СамНЦ РАН, 2017. – С. 834–838. – ISBN 978-5-93424-784-4.

10 **Смоленцев, Н. К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – Москва : ДМК Пресс, 2009. – 448 с. – ISBN 594074415X.

11 **Холодков, И. В.** Схемотехника : учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1. Аналоговая схемотехника / И. В. Холодков. – Иваново, 2013. – 152 с.

12 **Филинов, В. В.** Электроника и схемотехника. Расчет спектров электрических сигналов : учебно-методическое пособие / В. В. Филинов. – Москва : МГУПИ, 2014.

13 **Сергиенко, А. Б.** Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – 3-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с. – ISBN 978-5-9775-0606-9.

14 Цифровая обработка сигналов : учебное пособие / Ю. Н. Матвеев, К. К. Симончик, А. Ю. Тропченко, М. В. Хитров. – Санкт-Петербург : СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.

6 **Bushuev, S. V.** Investigation of the accuracy of measurements of RMS values of electrical signals at limited time intervals / S. V. Bushuev, A. N. Popov // Transport of the Urals. – 2011. – No. 2 (29). – P. 46–50. – EDN NWGZDZ.

7 **Vashkevich, M. I.** Comparison of time-frequency transformations: Fourier analysis, wavelets and banks of filters based on phase transformation / M. I. Vashkevich, I. S. Azarov // Digital signal processing. – No. 2. – 2020. – P. 13–26. – ISSN 1684-2634.

8 **Cherezov, G. A.** Mathematical formulation of the problem of technical diagnostics of tonal rail circuits equipment / G. A. Cherezov, V. B. Leushin, O. A. Katsyuba // Transport intelligent systems : collection of materials of the I International Scientific and practical Conference "Transport Intelligent Systems – 2017" (TIS-2017) (February 16–17, 2017) / edited by V. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov. – Saint Petersburg : PGUPS, 2017. – P. 81–86. – ISBN 978-5-7641-0975-6.

9 **Cherezov, G. A.** Constructing a feature space from the coefficients of the wavelet transform / G. A. Cherezov, A. N. Popov // Promising information technologies (PIT-2017) : proceedings of the International Scientific and Technical Conference / edited by S. A. Prokhorov. – Samara : SamSC RAS, 2017. – P. 834–838. – ISBN 978-5-93424-784-4.

10 **Smolentsev, N. K.** Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB / N. K. Smolentsev. – Moscow : DMK Press, 2009. – 448 p. – ISBN 594074415X.

11 **Kholodkov, I. V.** Circuit engineering : a textbook. In 2 parts. Part 1. Analog circuitry / I. V. Kholodkov. – Ivanovo, 2013. – 152 p.

12 **Filinov, V. V.** Electronics and circuit engineering. Calculation of the spectra of electrical signals : an educational and methodological guide / V. V. Filinov. – Moscow : MGUPI, 2014.

13 **Sergienko, A. B.** Digital signal processing / A. B. Sergienko. – 3rd ed. – Saint Petersburg : BHV-Petersburg, 2011. – 768 p. – ISBN 978-5-9775-0606-9.

14 Digital signal processing : a textbook / Yu. N. Matveev, K. K. Simonchik, A. Y. Tropchenko, M. V. Khitrov. – Saint Petersburg : SPbNIU ITMO, 2013. – 166 p.

15 Гимпилевич, Ю. Б. Сигналы и процессы в радиоэлектронике : учебное пособие / Ю. Б. Гимпилевич. – Севастополь : Издательство Севастопольского государственного университета, 2019. – 247 с.

16 Якимов, Е. В. Цифровая обработка сигналов : учебное пособие / Е. В. Якимов, Г. В. Вавилова, И. А. Клубович. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 306 с. – ISBN 5-98298-326-6.

17 Глинченко, А. С. Цифровая обработка сигналов. В 2 ч. Ч. 1 / А. С. Глинченко. – Красноярск : КГТУ. 2001. – 199 с.

18 Кривошеев, В. И. Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ) : учебно-методический материал / В. И. Кривошеев. – Нижний Новгород, 2006. – 117 с.

19 Аналого-цифровые и цифровые устройства : методическое пособие / сост. А. Б. Давыдов, М. В. Качинский, В. Б. Ключ. – Минск : БГУИР, 2007. – 52 с. – ISBN 978-985-444-039-2.

20 Устройство «Блок формирования сигнала БФС-Ш» : руководство по эксплуатации Ш1.00.00 РЭ. – 2024.

15 Gimpilevich, Yu. B. Signals and processes in radio electronics : a textbook / Yu. B. Gimpilevich. – Sevastopol : Publishing House of the Sevastopol State University, 2019. – 247 p.

16 Yakimov, E. V. Digital signal processing : a textbook / E. V. Yakimov, G. V. Vavilova, I. A. Klubovich. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2008. – 306 p. – ISBN 5-98298-326-6.

17 Glinchenko, A. S. Digital signal processing. In 2 parts. Part 1 / A. S. Glinchenko. – Krasnoyarsk : KSTU. 2001. – 199 p.

18 Krivosheev, V. I. Modern methods of digital signal processing (digital spectral analysis) : educational and methodological material / V. I. Krivosheev. – Nizhny Novgorod, 2006. – 117 p.

19 Analog-digital and digital devices : a methodological guide / comp. A. B. Davydov, M. V. Kachinsky, V. B. Klyus. – Minsk : BGUIR, 2007. – 52 p. – ISBN 978-985-444-039-2.

20 The device "Signal generation signal BFS-Sh" : operating manual Sh1.00.00 RE. – 2024.

V. V. Shtanke

METHODS FOR ANALYZING THE SIGNALS OF A MAGNETOINDUCTION SENSOR WHEN PASSING WHEEL SETS OF ROLLING STOCK

Abstract. The relevance of the study is due to the introduction of a unified train traffic control system on mainline railways based on microprocessor technologies. Track sensors play a significant role in the technical diagnostics systems of traction rolling stock. The Scientific and Innovation Center "Transport Safety" (SIC TS) of the Rostov State Transport University conducted a study of the parameters of the signal received when the wheel passes over magnetoinduction sensors; new sensor designs and the method of processing their signals make it possible not only to count the axles, but also to identify wheel defects.

The analysis of signals modulated by a magnetoinduction sensor when a rolling stock wheelset passes over it, thanks to modern hardware and software complexes and the capabilities of graphical data presentation, can reflect the real picture of the profile of the wheelsets of a passing train, and also allows you to determine bogie distortions, the presence of dragging parts, critically overheated axle boxes. The article presents a graph-digital signal processing method for obtaining diagnostic information for monitoring the condition of wheels of railway rolling stock.

Keywords: magnetoinduction sensor, signal parameters, deterministic signals, wheelset defects, defect fixation algorithm, interference simulation.

For citation: Shtanke, V. V. Methods for analyzing the signals of a magnetoinduction sensor when passing wheel sets of rolling stock / V. V. Shtanke // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 56–67. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_56.

Сведения об авторах**Штанке Вероника Валерьевна**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
научно-внедренческий центр «Безопасность
транспорта»,
начальник,
e-mail: arnold.shtanke@yandex.ru

Information about the authors**Shtanke Veronika Valerievna**

Rostov State Transport University (RSTU),
Scientific and Innovation Center «Transport
Safety»,
Head of the Centre,
e-mail: arnold.shtanke@yandex.ru

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.131 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_68

*М. В. Окост, А. В. Морозов, Т. В. Суворова, В. Л. Шаповалов***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГРУНТА
В УСЛОВИЯХ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО НАГРУЖЕНИЯ ***

Аннотация. Работа посвящена изучению деформаций образцов глинистого грунта, а также оценке их накопления для условий приложения многократных циклических нагрузок в условиях осесимметричного нагружения, имитирующих работу грунтов насыпей при поездном воздействии. Исследования проведены для образцов глинистого грунта, находящихся в максимально-уплотненном и недоуплотненном состояниях, а также при влажности грунта выше оптимальной. Полученные зависимости экстраполированы на период длительной эксплуатации функцией из трех экспонент. Такая методика может оказаться востребованной при определении сроков консолидации и величины накопления остаточных деформаций грунтовых инженерных сооружений, подверженных циклическим нагрузкам и воздействиям.

Ключевые слова: земляное полотно, нагрузки и воздействия, метод трехосного сжатия, прогноз накопления деформаций.

Для цитирования: Исследование влияния циклических воздействий на деформирование грунта в условиях осесимметричного нагружения / М. В. Окост, А. В. Морозов, Т. В. Суворова, В. Л. Шаповалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 68–78. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_68.

Введение

В процессе многолетней эксплуатации конструкция железнодорожного пути подвергается нагрузкам от поездов и воздействиям факторов природно-климатической среды [1]. При этом земляное полотно, служащее основанием для размещения верхнего строения пути, должно обеспечивать надежную и долговечную работу без проявления деформаций, поскольку последнее может нарушить геометрию пути и снизить безопасность движения, а ремонты земляного полотна относятся к наиболее дорогостоящим для железнодорожного пути в целом. В связи с этим национальные нормативные документы, регламентирующие проектирование и строительство земляного полотна, предусматривают жесткие требования к его деформативности на весь срок эксплуатации железных дорог. Например, в соответствии с СТУ-3 «Земляное полотно участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству» максимальная накопленная остаточная деформация основной площадки земляного полотна при верхнем строении пути с ездой на балласте не должна превышать 100 мм за 25 лет эксплуатации при интенсивности не более 10 мм в год.

Одним из способов решения этой проблемы на стадии проектирования является метод компьютерного моделирования свойств конструкции, учитывающий изменение свойств ее элементов и строительных материалов под действием длительных воздействий. Точность решения этой задачи во многом определяется выработкой оптимальных подходов к моделированию многократного воздействия поездных нагрузок на грунт [2], методов определения изменения свойств грунтов для прогнозирования деформаций земляного полотна в период жизненного цикла железных дорог.

В данной работе описано, как эта задача решается приложением к образцам грунта многочисленных воздействий в условиях осесимметричного нагружения в приборе трехосного сжатия (стабилометре).

Полученные результаты сравнены между собой, а закономерности их изменения экстраполированы на период длительной эксплуатации (жизненного цикла) земляного полотна.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-20005).

Постановка задачи

Одним из диагностических признаков стабильности и долговечности земляного полотна является прогноз накопления остаточных деформаций земляного полотна в процессе жизненного цикла [3]. Данный параметр необходим как на стадии проектирования (для обоснованного принятия противодеформационных технических решений), так и в процессе технического обслуживания и планирования ремонтов. В данном исследовании проведена оценка накопления остаточных деформаций образцов грунта в процессе циклического нагружения и определено влияние степени уплотнения грунта и его влажности на накопление остаточных деформаций.

Метод исследования

Измерения выполнены в лабораторных условиях при осесимметричном нагружении в приборе трехосного сжатия (одометре) в соответствии с ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия». Исследования характеристик грунтов в одометрах, в отличие от условий компрессионного сжатия, позволяют исключить ограничения бокового расширения и проводить исследования в условиях бокового давления, приближенного к реальным условиям эксплуатации грунта.

Исследования проводились на образцах грунта нарушенного строения, которые были подготовлены с использованием прибора стандартного уплотнения. Образцы грунта нарушенного строения предварительно были увлажнены до оптимальной влажности ($W_{opt} = 19,5 \pm 0,5 \%$) и далее уплотнены до двух состояний плотности: первое состояние – грунт уплотнен до его максимальной плотности (коэффициент уплотнения $K_{уп} = 1,0$), которая без учета влажности (в пересчете на массу сухого образца) составила $\rho_{d\max} = 1,66 \text{ г/см}^3$; второе состояние – грунт уплотнен с коэффициентом уплотнения $K_{уп} = 0,94$ (плотность в пересчете на массу сухого образца составила $\rho_d = 1,56 \text{ г/см}^3$).

При циклических воздействиях в режиме «нагрузка-разгрузка» [4, 5] по схеме испытаний значения наибольшего главного напряжения σ_1 изменялись в пределах, обеспечивающих давления на грунт с учетом действия нагрузки от собственного веса грунта (P_γ), веса верхнего строения пути ($P_{ВСП}$), а также нагрузки от подвижного состава (P_n). Нагрузки P_γ и $P_{ВСП}$ учитывались, как постоянно действующие, а нагрузка P_n задавалась циклами «нагрузка-разгрузка» величиной в режиме нагружения 80 кПа (СП 32.104.98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм»). В условиях роста осевых и погонных нагрузок расчеты проводились также и для моделирования режимов нагружения давлением 100 и 120 кПа. Наибольшие главные напряжения σ_1 с учетом работы грунта земляного полотна под нагрузкой были рассчитаны в программе Plaxis и аналитически (по методу Г. М. Шахунянца). Расчетная модель представлена однопутной насыпью высотой 12 м. Для расчетов в программе Plaxis приняты модели грунта Мора – Кулона [6] и Hardening soil [7]. По результатам расчетов построены зависимости распределения напряжений σ_1 в земляном полотне по оси пути (рис. 1).

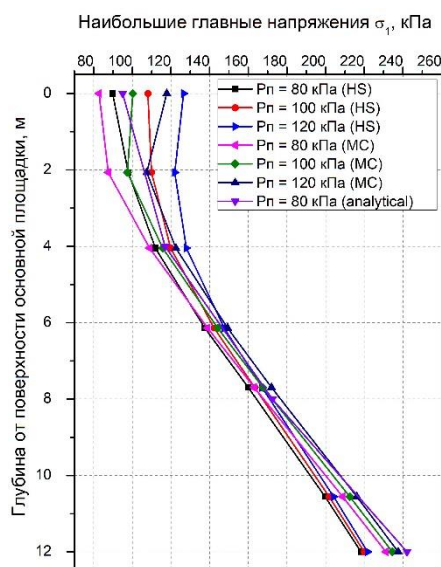


Рис. 1. Зависимости распределения напряжений σ_1 в земляном полотне по оси пути, рассчитанные в программе Plaxis (модели Мора – Кулона и Hardening soil) и аналитически

Наименьшее главное напряжение σ_3 было рассчитано с учетом коэффициента бокового давления K_0 , принятого равным 0,35 (СП 23.13330.2018 «Основания гидротехнических сооружений» (актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85)) для глинистых грунтов твердой консистенции (для подготовленных образцов грунта $I_L = 0,02$). В режиме разгрузки напряжения σ_1 снимались до наименьшего главного напряжения σ_3 , равного заданному всестороннему давлению. Расчетные точки для проведения циклических нагружений приняты в уровне основной площадки (ОП) и на глубине 6,0 м от поверхности ОП.

В табл. 1 приведены значения наибольшего σ_1 и наименьшего σ_3 главных напряжений, которые задавались программой испытаний для случаев действия поездной нагрузки 80 кПа и при расположении расчетных сечений на разной глубине от поверхности ОП.

Таблица 1

Наибольшие и наименьшие главные напряжения σ_1 и σ_3 в режиме «нагрузка-разгрузка»

Глубина от поверхности ОП, м	Интенсивность поездной нагрузки P_n , кПа
	80
0,0–0,01	$\sigma_1 = 90$; $\sigma_3 = 31$
6,0	$\sigma_1 = 136$; $\sigma_3 = 47$

Для оценки влияния циклических воздействий и накопления остаточных деформаций при работе грунта под нагрузкой, количество циклов в режиме «нагрузка-разгрузка» на начальном этапе задавались 500 и 1000 воздействиями.

На рис. 2 приведена схема проведения циклических испытаний образца грунта при количестве воздействий «нагрузка-разгрузка» $n = 1000$ для случая $P_n = 80$ кПа при моделировании работы грунта на глубине 6,0 м от поверхности ОП. После циклических воздействий образец грунта разрушался по критерию достижения вертикальной деформации, составляющей 15 % начальной высоты образца. Испытания по аналогичной схеме были проведены при количестве циклов «нагрузка-разгрузка» $n = 500$ для образцов грунта в максимально уплотненном и недоуплотненном состояниях для условий расположения расчетного сечения на поверхности ОП и на глубине 6,0 м от поверхности ОП.

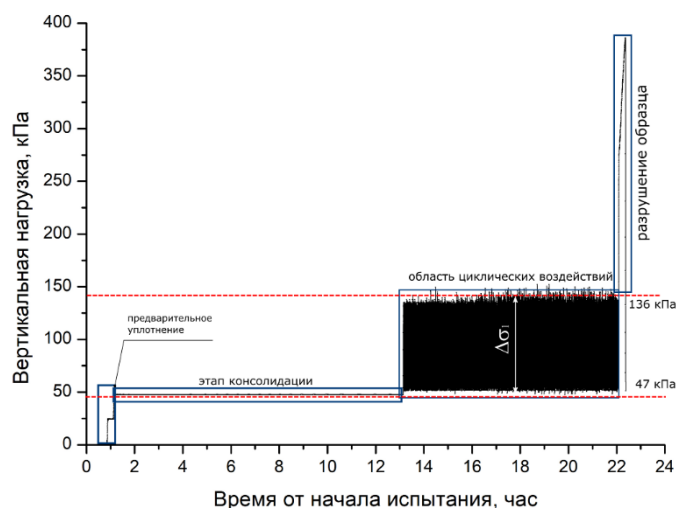


Рис. 2. Схема проведения циклических испытаний образца грунта в стабилометре для случая: $P_n = 80$ кПа, глубина от поверхности ОП составляет 6,0 м, $n = 1000$ циклов

Обработка результатов измерений

Определение величины накопления остаточных деформаций образцов грунта, находящегося в максимально уплотненном и недоуплотненном состояниях при различном количестве воздействий «нагрузка-разгрузка».

На первом этапе было изучено деформирование образцов грунта в максимально уплотненном и недоуплотненном состояниях при различном количестве механических воздействий «нагрузка-разгрузка» ($n = 500$ и 1000).

На рис. 3 приведены результаты измерения вертикальных деформаций образцов грунта во времени при проведении циклических испытаний в стабилометре для случая: $P_n = 80$ кПа, глубина от поверхности ОП – 6,0 м. Графики приведены для количества циклов «нагрузка-разгрузка» $n = 500$ и $n = 1000$ при подготовке образцов грунта в максимально уплотненном ($K_{уп} = 1,0$) и недоуплотненном ($K_{уп} = 0,94$) состояниях. При обработке результатов получены усредненные значения деформаций в режиме «нагрузка-разгрузка» и представлена экстраполяция полученных графиков функцией их трех экспонент.

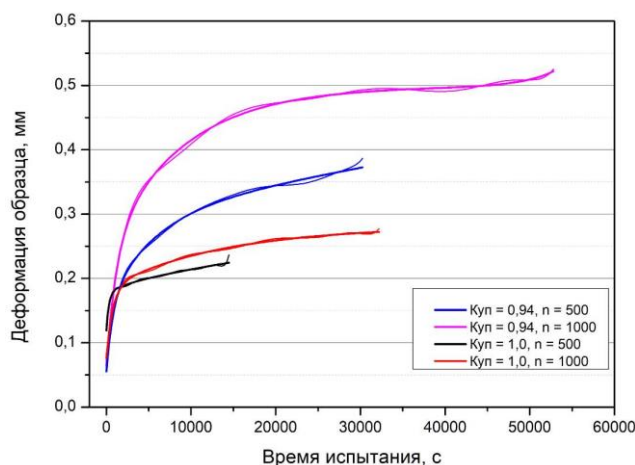


Рис. 3. Вертикальные деформации образцов грунта во времени при проведении циклических испытаний в стабилометре для случая: $P_n = 80$ кПа, глубина от поверхности ОП составляет 6,0 м ($\sigma_1 = 136$ кПа, $\sigma_3 = 47$ кПа)

При анализе графиков, приведенных на рис. 3, можно сделать следующие выводы:

– при циклических нагружениях начальное уплотнение грунта значительно влияет на деформации грунта. Так, величина деформации грунта после 1000 циклов «нагрузка-разгрузка» для образцов при их максимальном уплотнении составила 0,272 мм, а в недоуплотненном – 0,525 мм, что составляет около 52 %;

– механические воздействия в количестве 500 штук недостаточны для оценки деформативности образцов грунта. После 45000 секунд испытаний недоуплотненный образец грунта (розовая линия) начал проявлять пластические свойства, в то время как максимально уплотненный образец после 500 циклов воздействий проявлял упругие свойства.

Последующие исследования и обработка результатов испытаний выполнены для образцов, подверженных 1000 механических воздействий «нагрузка-разгрузка».

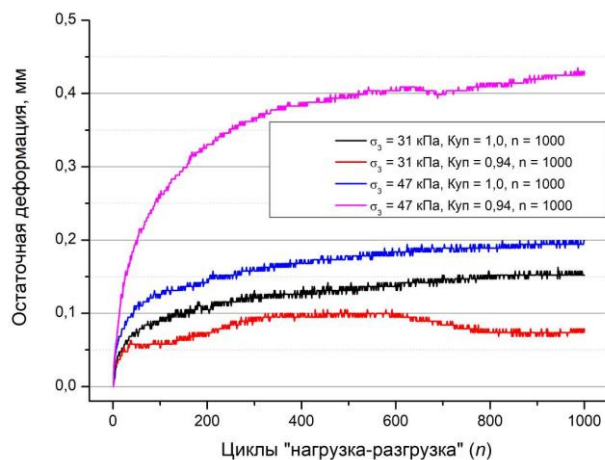


Рис. 4. Зависимости накопления остаточных деформаций образцов грунта при проведении циклических испытаний в стабилометре

На рис. 4 приведены графики накопления остаточных деформаций образцов грунта при проведении циклических испытаний в стабилометре для случая: $P_n = 80$ кПа и глубины от поверхности ОП

0,0 м и 6,0 м. Графики приведены для количества циклов «нагрузка-разгрузка» $n = 1000$ при подготовке образцов грунта в максимально уплотненном ($K_{уп} = 1,0$) и недоуплотненном ($K_{уп} = 0,94$) состояниях.

Интенсивное накопление остаточных деформаций максимально уплотненных грунтов (черная и синяя линии) наблюдается в пределах первых 80–100 циклов нагружения. Далее графики ведут себя стабильно без видимых искажений и после 300–400 циклов воздействия грунты проявляют только упругие свойства.

Накопление остаточных деформаций недоуплотненных грунтов при моделировании их работы на глубине 6,0 м значительно больше (в два раза после 1000 циклов воздействий).

Недоуплотненные грунты при моделировании их работы в уровне основной площадки ведут себя не характерно по сравнению с максимально уплотненными грунтами (интервалы от 40 до 300 циклов и от 600 до 1000 циклов, рис. 4) и проявляют пластические свойства, в то время как на глубине 6,0 м ($\sigma_3 = 47$ кПа) таких процессов не наблюдается.

Для полученных зависимостей для образцов грунта в максимально уплотненном состоянии после 1000 механических воздействий «нагрузка-разгрузка» проведена аппроксимация комбинацией из трех экспоненциальных функций (рис. 5).

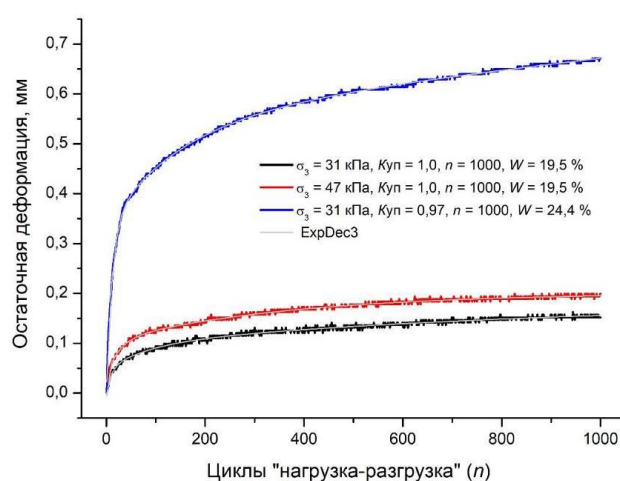


Рис. 5. Остаточные (накопленные) деформации образцов грунта и результаты аппроксимации комбинацией из трех экспонент приведены линиями серого цвета

Точность экстраполяции значений остаточной деформации набором трех экспонент проведена следующим численным экспериментом. Выполним построение графиков аппроксимирующих экспоненциальных функций в наборах последних 100 значений (интервал для циклов «нагрузка-разгрузка» $n = 900 \dots 1000$). Рассчитанные и измеренные значения остаточных деформаций позволяют оценить точность математических процедур (рис. 6–8 и табл. 2).

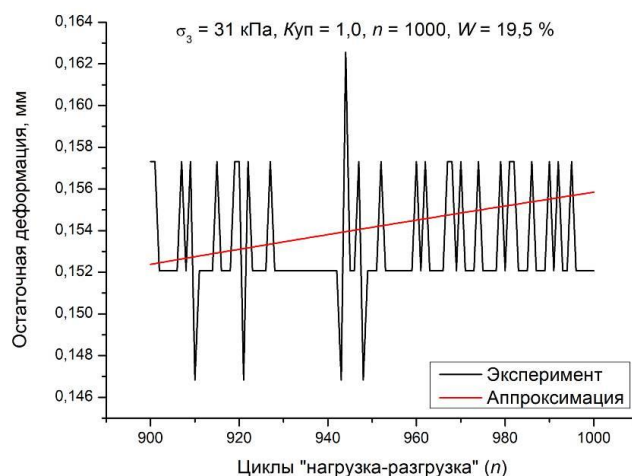


Рис. 6. Остаточные (накопленные) деформации образцов грунта для интервала циклов «нагрузка-разгрузка» $n = 900 \dots 1000$ и результаты аппроксимации комбинацией из трех экспонент: $\sigma_3 = 31$ кПа, $K_{уп} = 1,0$, $n = 1000$, $W = 19,5$ %

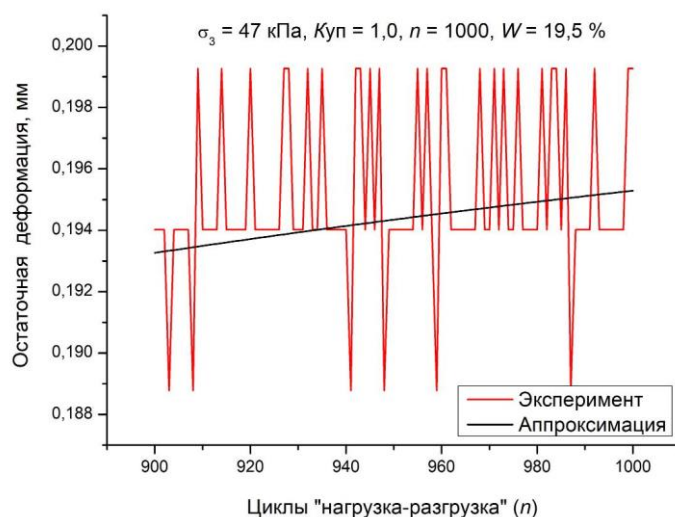


Рис. 7. Остаточные (накопленные) деформации образцов грунта для интервала циклов «нагрузка-разгрузка» $n = 900 \dots 1000$ и результаты аппроксимации комбинацией из трех экспонент: $\sigma_3 = 47$ кПа, $K_{уп} = 1,0$, $n = 1000$, $W = 19,5$ %

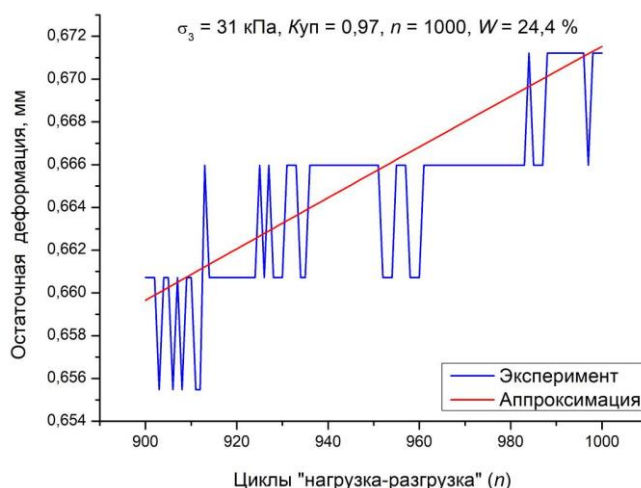


Рис. 8. Остаточные (накопленные) деформации образцов грунта для интервала циклов «нагрузка-разгрузка» $n = 900 \dots 1000$ и результаты аппроксимации комбинацией из трех экспонент. $\sigma_3 = 31$ кПа, $K_{уп} = 0,97$, $n = 1000$, $W = 24,4$ %

Результаты статистической обработки экспериментальных кривых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические результаты аппроксимации экспериментальных кривых функцией из трех экспонент

Данные эксперимента	Reduced Chi-Sqr (Origin)	Fit status (Origin)	Adjusted R-square (Origin)	Абс. погрешность	Относит. погрешность, %
$\sigma_3 = 31$ кПа, $K_{уп} = 1,0$, $n = 1000$, $W = 19,5$ %	$1,13E^{-05}$	Succeeded (100)	0,98371	0,003	1,67
$\sigma_3 = 47$ кПа, $K_{уп} = 1,0$, $n = 1000$, $W = 19,5$ %	$8,73E^{-06}$	Succeeded (100)	0,99054	0,002	0,98
$\sigma_3 = 31$ кПа, $K_{уп} = 0,97$, $n = 1000$, $W = 24,4$ %	$9,72E^{-06}$	Succeeded (100)	0,99889	0,002	0,31

Fit status code (100) – Fit succeeded. Chi-square was reduced and the tolerance was reached (Подгонка прошла успешно. Хи-квадрат был уменьшен и допуск был достигнут).

Результаты экстраполяции экспериментальных кривых полученными экспоненциальными функциями на перспективу после 3 504 000 воздействий «нагрузка-разгрузка» приведены на рис. 9. Указанное количество механических воздействий рассчитано исходя из данных об интенсивности движения поездов (48 пар поездов в сутки или 96 поездов в двух направлениях по одному участку в сутки с учетом ста лет эксплуатации объекта).

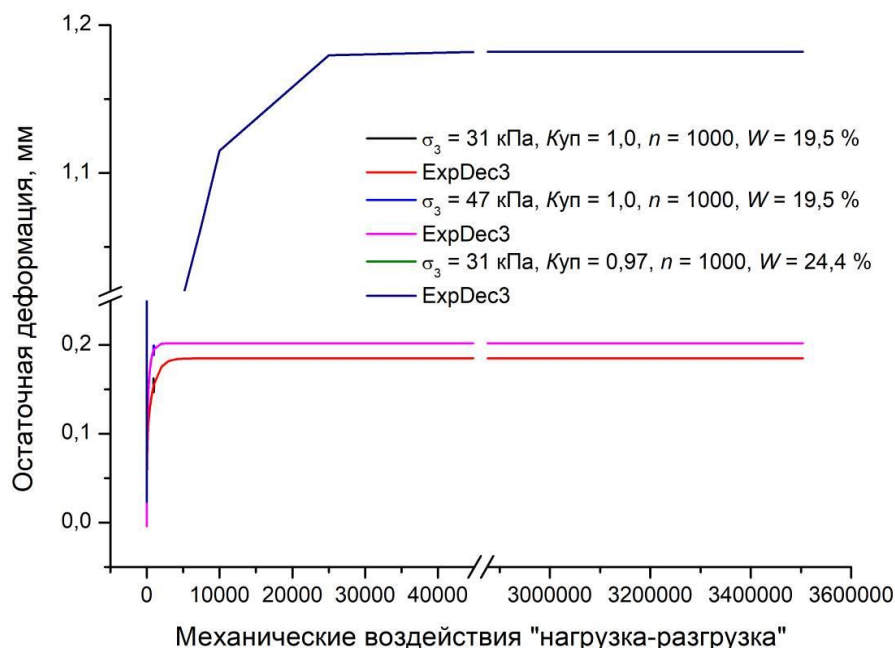


Рис. 9. Остаточные (накопленные) деформации образцов грунта. Экстраполяция экспериментальных графиков функциями из трех экспонент

Результаты статистической обработки экспериментальных и аппроксимирующих кривых приведены в табл. 2 и показали высокую степень их сходимости.

Как видно из графиков рис. 9, грунты в максимальном уплотнении при моделировании их работы как в уровне основной площадки, так и на глубине 6,0 м проявляют упругие свойства после 4000–5000 циклических воздействий, что соответствует времени после начала эксплуатации 1,5–2 месяца при интенсивности движения 96 поездов в двух направлениях. Величина деформации на данном этапе для грунтов в уровне основной площадки и на глубине 6,0 м составляет 0,18 мм и 0,2 мм соответственно.

Определение величины разрушающей вертикальной нагрузки после циклических воздействий

В качестве дополнительных критериев для оценивания деформационных характеристик грунта после циклических воздействий были приняты следующие:

- девиатор напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$, при котором достигается деформация 15 % от начальной высоты образца. Для образцов грунта высотой 100 мм такая деформация составляет 15 мм;
- нагрузка, при которой график зависимости деформаций от девиатора напряжений $\varepsilon = f(q)$, имеет резкое изменение характера линии.

В качестве примера на рис. 10 изображены зависимости относительной вертикальной деформации образцов грунта в максимально уплотненном ($K_{уп} = 1,0$) и недоуплотненном ($K_{уп} = 0,94$) состояниях после 1000 циклов нагружения-разгружения ($n = 1000$). При моделировании расположения образца в уровне ОП (глубина 0–0,1 м). Интервал давления нагрузка-разгрузка ($\sigma_1 - \sigma_3$) задавался в пределах 59 кПа при всестороннем давлении $\sigma_3 = 31$ кПа. При моделировании расположения образца на глубине 6,0 м от поверхности ОП интервал давления нагрузка-разгрузка ($\sigma_1 - \sigma_3$) задавался в пределах 89 кПа при всестороннем давлении $\sigma_3 = 47$ кПа.

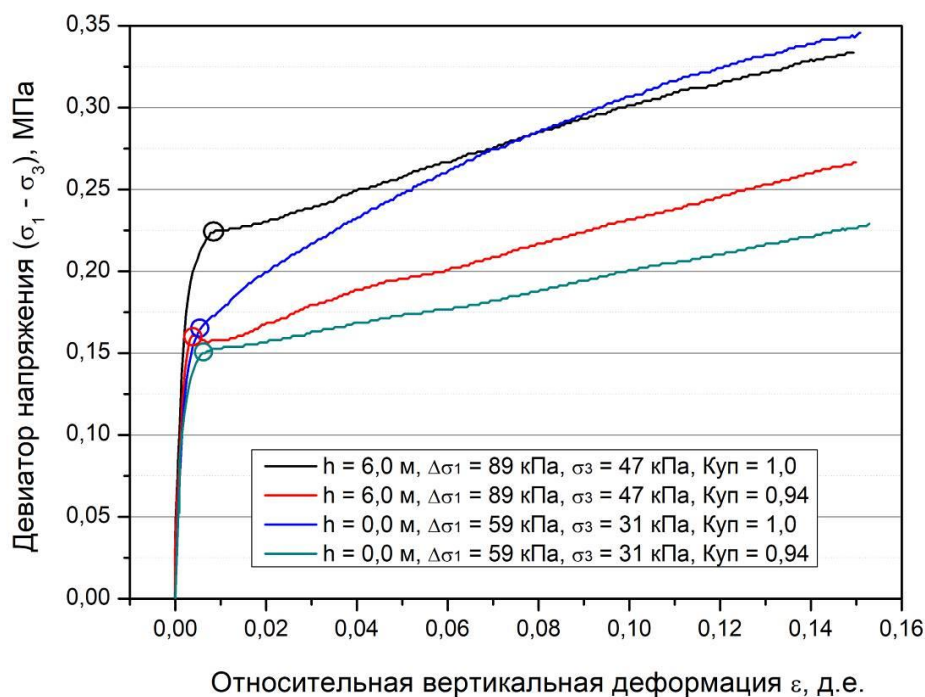


Рис. 10. Зависимости относительной вертикальной деформации образцов грунта в максимально уплотненном ($K_{уп} = 1,0$) и недоуплотненном ($K_{уп} = 0,94$) состояниях после 1000 циклов нагружения-разгружения

Результаты обработки измерений для серии испытаний ($n = 500$ и 1000) сведены в табл. 3.

Таблица 3

Предельная разрушающая нагрузка $\sigma_1 - \sigma_3$ после циклических нагружений при достижении деформации 15 % и нагрузка, при которой график $\varepsilon = f(q)$ имеет резкое изменение характера линии (рис. 10, окружности соотв. цвета)

№ п/п	Глубина от пов-ти ОП, м	Циклы	Куп	Предельная разрушающая нагрузка $\sigma_1 - \sigma_3$ (кПа) при достижении деформации 15 %	Нагрузка, при которой график $\varepsilon = f(q)$ имеет резкое изменение характера линии, кПа
				Интенсивность поездной нагрузки $P_n = 80$ кПа	
1	0,0	500	1,0	330	203 (не ярко выражено)
2			0,94	383	189
3		1000	1,0	346	169
4			0,94	229	149
5	-6,0	500	1,0	462	не имеет
6			0,94	427	226
7		1000	1,0	335	225
8			0,94	268	162

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показал, что предельная разрушающая нагрузка при достижении деформации образцов грунта 15 % после 1000 циклов нагружения и разгрузки изменяется в зависимости от уплотнения и составляет 346 кПа и 335 кПа для максимально уплотненных грунтов и 229 кПа и 268 кПа для недоуплотненных грунтов при моделировании их работы в уровне ОП и на глубине 6,0 м.

На графиках зависимости относительной вертикальной деформации образцов грунта в максимально уплотненном и недоуплотненном состояниях после циклов нагружения-разгружения выделены величины нагрузок, при которых график $\varepsilon = f(q)$ имеет резкое изменение характера линии, указывающее на нарушение целостности образца (проявление линий скольжения). Рассматриваемые величины нагрузок составили для недоуплотненных образцов 149 кПа и 162 кПа при моделировании их работы в уровне ОП и на глубине 6,0 м и 169 кПа и 225 кПа для максимально уплотненных образцов.

Обсуждение результатов

Исследовано деформирование образцов грунта в максимально уплотненном (коэффициент уплотнения $K_{уп} = 1,0$) и недоуплотненном (коэффициент уплотнения $K_{уп} = 0,94$) состояниях при различном количестве механических воздействий «нагрузка-разгрузка» (500 и 1000 штук) в условиях осесимметричного нагружения. Измерены вертикальные деформации образцов грунта во времени при проведении циклических испытаний в стабилометре при моделировании действия поездной нагрузки 80 кПа на глубине от поверхности ОП – 6,0 м. Получены усредненные значения деформаций в режиме «нагрузка-разгрузка» и проведена экстраполяция полученных графиков функцией из трех экспонент. Установлено, что при циклических нагружениях начальное уплотнение грунта значительно влияет на деформации образца. Величина деформации грунта после 1000 циклов «нагрузка-разгрузка» для образцов при $K_{уп} = 1,0$ составила 0,272 мм, а при $K_{уп} = 0,94$ – 0,525 мм. Механические воздействия в количестве 500 штук недостаточны для оценки деформативности образцов грунта.

Определены величины накопления остаточных деформаций образцов грунта при $K_{уп} = 1,0$ и $K_{уп} = 0,94$ и при различном количестве воздействий, и установлено, что интенсивное накопление остаточных деформаций при $K_{уп} = 1,0$ наблюдается в пределах первых 80–100 циклов нагружения. Далее графики ведут себя стабильно без видимых искажений и после 3000–4000 циклов воздействия будут проявлять только упругие свойства. Накопление остаточных деформаций недоуплотненных грунтов при моделировании их работы на глубине 6,0 м значительно больше (в два раза после 1000 циклов). Грунты с $K_{уп} = 0,94$ при моделировании их работы в уровне основной площадки ведут себя не характерно по сравнению с максимально уплотненными грунтами (интервалы от 40 до 300 циклов и от 600 до 1000 циклов, рис. 4) и проявляют пластические свойства, в то время как на глубине 6,0 м таких процессов не наблюдается.

Для полученных зависимостей для образцов грунта при $K_{уп} = 1,0$ проведена аппроксимация комбинацией из трех экспоненциальных функций (рис. 5). Результаты статистической обработки экспериментальных и аппроксимирующих кривых показали высокую степень их сходимости. Грунты с $K_{уп} = 1,0$ при моделировании их работы как в уровне ОП, так и на глубине 6,0 м при экстраполяции экспериментальных кривых на перспективу после 3500000 воздействий «нагрузка-разгрузка» проявляют упругие свойства после 4000–5000 циклических воздействий. Величина деформации на данном этапе для грунтов в уровне основной площадки и на глубине 6,0 м составила 0,18 мм и 0,2 мм соответственно.

Установлены зависимости относительной вертикальной деформации образцов грунта при $K_{уп} = 1,0$ и $K_{уп} = 0,94$ после 1000 циклов нагружения-разгружения при моделировании расположения образца в уровне основной площадки и на глубине 6,0 м в теле земляного полотна.

Анализ результатов определения величины предельной разрушающей вертикальной нагрузки после циклических воздействий показал, что ее величина при достижении деформации образцов грунта 15 % после 1000 циклов нагружения и разгрузки изменяется в зависимости от $K_{уп}$ и составляет 346 кПа и 335 кПа для $K_{уп} = 1,0$ и 229 кПа и 268 кПа для $K_{уп} = 0,94$ при моделировании их работы в уровне основной площадки и на глубине 6,0 м.

На графиках зависимости относительной вертикальной деформации образцов грунта от девиатора напряжений при $K_{уп} = 1,0$ и $K_{уп} = 0,94$ после 1000 циклов нагружения-разгружения выделены величины нагрузок, при которых график $\varepsilon = f(q)$ имеет резкое изменение характера линии, указывающее на нарушение целостности образца (проявление линий скольжения). Рассматриваемые величины нагрузок составили для недоуплотненных образцов 149 кПа и 162 кПа при моделировании их работы в уровне основной площадки и на глубине 6,0 м и 169 кПа и 225 кПа для максимально уплотненных образцов.

Выводы

Вертикальные деформации недоуплотненных образцов грунта при моделировании их работы в стабилометре отличаются от максимально уплотненных более чем в два раза после 1000 циклов механических воздействий.

Максимально уплотненные грунты начинают проявлять упругие свойства после 800 циклов механических воздействий. Накопление остаточных деформаций недоуплотненных грунтов наблюдается на протяжении всех 1000 циклов.

Образцы грунта в максимальном уплотнении при анализе экстраполированных кривых на перспективу после 3500000 воздействий «нагрузка-разгрузка» проявляют упругие свойства после 4000–5000 циклических воздействий, что соответствует времени после начала эксплуатации 1,5–2 месяца.

Увлажнение грунта выше оптимального значения на 5 % приводит к росту накопления остаточных деформаций более чем в три раза, и образцы грунта проявляют упругопластическое деформирование.

Упругопластическое деформирование переувлажненного грунта на экстраполированных кривых наблюдается до 25000–30000 циклических воздействий, что соответствует продолжительности стабилизации до 1,4 года.

Список литературы

- 1 **Ашпиз, Е. С.** Основная площадка при осевых нагрузках 27 тс / Е. С. Ашпиз, В. В. Виноградов // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 22–25. – ISSN 0131-5765.
- 2 Modeling of long-term train loads impacts on subgrade soils : a review / V. Yavna, V. Shapovalov, M. Okost [et al.] // International Journal of Transportation Science and Technology. – 2023. – Т. 12, No. 3. – P. 729–752.
- 3 **Сидорова, Е. А.** Возникновение остаточных деформаций земляного полотна и их влияние на безопасность движения / Е. А. Сидорова, В. О. Певзнер, И. М. Анисина // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2021. – № 5–6. – С. 35–40. – ISSN 2304-9642.
- 4 Модель деформируемости грунтового основания железнодорожного пути при пропуске большого количества поездов с различной нагрузкой / А. В. Анисин, И. М. Анисина, С. С. Надёжин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – Серия : Математическое моделирование физических процессов. – 2021. – № 4. – С. 67–75. – ISSN 2414-0171.
- 5 **Zhu, S.** Elastoplastic modeling of cyclic behavior of natural structured clay with large number of cycles / S. Zhu, R.–P. Chen, Z.–Y. Yin // Transportation Geotechnics. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100448> (дата обращения: 01.09.2024).
- 6 **Кудашева, М. И.** Сравнение модели Мора – Кулона и модели упрочняющегося грунта в программном комплексе Plaxis / М. И. Кудашева, С. В. Калошина // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 87–95.
- 7 **Мирный, А. Ю.** Механические модели грунтов hardening soil и soft soil – области применения / А. Ю. Мирный, А. З. Тер-Мартirosyan // Геотехника. – 2017. – № 1. – ISSN 2221-5514.

References

- 1 **Ashpiz, E. S.** The subgrade with axial loads of 27 tons / E. S. Ashpiz, V. V. Vinogradov // Track and track facilities. – 2019. – No. 12. – P. 22–25. – ISSN 0131-5765.
- 2 Modeling of long-term train loads impacts on subgrade soils : a review / V. Yavna, V. Shapovalov, M. Okost [et al.] // International Journal of Transportation Science and Technology. – 2023. – Т. 12, No. 3. – P. 729–752.
- 3 **Sidorova, E. A.** The occurrence of residual deformations of the roadbed and their impact on traffic safety / E. A. Sidorova, V. O. Pevzner, I. M. Anisina // Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC Russian Railways. – 2021. – No. 5–6. – P. 35–40. – ISSN 2304-9642.
- 4 The model of deformability of soil foundation of a railway track when passing a large number of trains with different loads / A. V. Anisin, I. M. Anisina, S. S. Nadezhin [et al.] // Issues of atomic science and technology. – Series : Mathematical modelling of physical processes. – 2021. – No. 4. – P. 67–75. – ISSN 2414-0171.
- 5 **Zhu, S.** Elastoplastic modeling of cyclic behavior of natural structured clay with large number of cycles / S. Zhu, R.–P. Chen, Z.–Y. Yin // Transportation Geotechnics. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100448> (date of access: 01.09.2024).
- 6 **Kudasheva, M. I.** Comparison of the Mohr – Coulomb model and the hardening soil model in the Plaxis software package / M. I. Kudasheva, S. V. Kaloshina // Modern technologies in construction. Theory and practice. – 2017. – Issue. 2. – P. 87–95.
- 7 **Mirny, A. Yu.** Mechanical models of hardening soil and soft soil – areas of application / A. Yu. Mirny, A. Z. Ter-Martirosyan // Geotechnics. – 2017. – No. 1. – ISSN 2221-5514.

M. V. Okost, A. V. Morozov, T. V. Suvorova, V. L. Shapovalov

STUDY OF THE INFLUENCE OF CYCLIC EFFECTS ON SOIL DEFORMATION UNDER AXISYMMETRIC LOADING

Abstract. The work is devoted to the study of deformations of clayey soil samples, as well as the assessment of their accumulation for the conditions of application of multiple cyclic loads under axisymmetric loading conditions, simulating the operation of embankment soils under train effect. The studies were carried out for clayey soil samples in maximally com-

pacted and underconsolidated states, as well as at soil moisture higher than optimal. The obtained dependences were extrapolated for the period of long-term operation by a function of three exponents. This methodology may be in demand when determining the consolidation time and the amount of accumulation of residual deformations of soil engineering structures subjected to cyclic loads and effects.

Keywords: roadbed, loads and effects, triaxial compression method, prediction of deformation accumulation.

For citation: Study of the influence of cyclic effects on soil deformation under axisymmetric loading / M. V. Okost, A. V. Morozov, T. V. Suvorova, V. L. Shapovalov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 68–78. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_68.

Сведения об авторах

Окост Максим Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскание, проектирование и строительство железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Морозов Андрей Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Физика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: rnd_cpd@mail.ru

Суворова Татьяна Виссарионовна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
доктор физико-математических наук, профессор,
e-mail: suvorova_tv111@mail.ru

Шапвалов Владимир Леонидович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Information about the authors

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Survey, design and construction of railways»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Physics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Suvorova Tatiana Vissarionovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Higher Mathematics »,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor,
e-mail: suvorova_tv111@mail.ru

Shapovalov Vladimir Leonidovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.212.7

DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_79

*А. С. Акельев, Р. Г. Король***ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ТЕРМИНАЛЬНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Аннотация. Изменение парадигмы функционирования транспортно-логистического рынка России, вызванное переориентацией основных потоков товародвижения на «восточное» направление, требует ускоренного технологического и инфраструктурного развития транспортной системы Дальневосточного региона. Осуществляется модернизация железнодорожной инфраструктуры Восточного полигона для пропуска заявленных объемов грузопотока, при этом необходимо обеспечить эффективную переработку транспортных средств и грузов на объектах терминально-логистической инфраструктуры. Цель работы заключается в разработке решений, направленных на увеличение перерабатывающей способности терминально-логистической инфраструктуры железнодорожного транспорта путем структурной оптимизации сети грузовых терминалов, консолидации грузопотоков и организации вспомогательных терминалов-демпферов. Задачи исследования включают анализ количественных показателей деятельности терминально-складского комплекса Дальневосточной железной дороги, описание характеристик и обоснование организации терминала-демпфера для передачи грузопотока. Предметом исследования являются технологические процессы и инфраструктурное развитие терминально-логистической инфраструктуры Дальневосточной железной дороги. В работе использованы теоретические методы исследования. Статья посвящена вопросам повышения эффективности функционирования грузовых терминалов за счет перераспределения грузопотоков между объектами терминально-логистической инфраструктуры железнодорожного транспорта. Предложена методика выбора грузового терминала для передачи грузопотока в условиях наличия ограничивающих факторов.

Ключевые слова: терминально-логистическая инфраструктура, Дальневосточная железная дорога, грузовые дворы, терминал-демпфер.

Для цитирования: Акельев, А. С. Оптимизация параметров функционирования терминально-логистической инфраструктуры железнодорожной транспортной системы / А. С. Акельев, Р. Г. Король // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 79–89. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_79.

Введение

Растущая потребность в транзитных грузовых перевозках через Дальний Восток требует развития терминально-логистической и транспортной инфраструктуры, а также совершенствования технологических процессов грузовой работы и решения вопросов оптимального распределения грузопотоков. Дальневосточные регионы, развивая свой транзитный потенциал через пограничные сухопутные переходы и портовые мощности, обладая обширной территорией, обильными запасами полезных ископаемых и серьезным экономическим потенциалом, имеют инфраструктурные ограничения для беспрепятственного продвижения грузопотоков по территории региона [1]. Перевозку основных объемов грузопотока обеспечивает железнодорожный транспорт, который является основным элементом международной интеграции со странами Азиатско-Тихоокеанского региона.

В текущих условиях, в связи с глобальным перестроением логистических цепочек и переориентации груза на «восточное» направление, нарастают темпы строительства железнодорожных линий, восполняя дефицитные показатели пропускной способности путевой инфраструктуры, однако недостаточно внимания уделяется проблемам развития терминально-логистической инфраструктуры. Поэтому в работе рассматривается технология увеличения перерабатывающей способности терминально-логистической инфраструктуры с помощью организации вспомогательных терминалов без значительных капитальных вложений с минимальным временем ввода в эксплуатацию. Необходимость в

таких терминалах продиктована быстроизменяющейся конъюнктурой рынка транспортных услуг, вновь формируемыми цепями поставок и увеличивающейся загрузкой новых направлений движения грузопотока [2].

Основная часть

Объем внешней торговли России с дружественными странами (Китай, Индия, Турция) в 2023 году увеличился на 66 % относительно 2022 года. В 2023 году доля внешнеторгового оборота России со странами Азиатско-Тихоокеанского региона достигла 74 %, где ключевым торговым партнером является Китайская Народная Республика, товарооборот с которой вырос на 26,3 %, составив 240,11 млрд долларов. За первое полугодие 2024 года товарооборот России и Китая увеличился на 1,8 % [5–7]. Перевозка внешнеторговых грузов на направлении «Россия – Китай» осуществляется через международные транспортные коридоры Дальнего Востока. Инфраструктурным каркасом транспортных коридоров является Дальневосточная железная дорога (ДВЖД), которая обеспечивает транспортировку грузопотока в международном сообщении через систему трансграничных переходов и морских портов. По итогам 2023 года через дальневосточные железнодорожные пограничные переходы было перевезено 43,9 млн т грузов, что на 26 % выше показателей 2022 года. Модернизация и развитие железнодорожной инфраструктуры ДВЖД позволили обеспечить в 2023 году транспортировку 217,9 млн т грузов, что на 5,9 % выше показателей 2022 года [3]. На рис. 1 приведена динамика увеличения объемов перевозки грузов на полигоне Дальневосточной железной дороге за период 2019–2023 годы с прогнозным значением на 2030 год [4].



Рис. 1. Объем перевезенных грузов по Дальневосточной железной дороге за 2019–2023 годы с перспективой на 2030 год

На сети Дальневосточной железной дороги функционируют четыре механизированные дистанции погрузочно-разгрузочных работ и коммерческих операций (МЧ), включающие 34 участка. Основной объем грузовой работы, порядка 93 %, приходится на семь участков: Хабаровск-2, Первая Речка, Находка, Гродеково, Уссурийск, Комсомольск и Советская Гавань. На показатели грузовой работы участка влияет территориальное расположение железнодорожных станций, уровень развития промышленности и транспортной инфраструктуры региона. Приграничные и припортовые станции обеспечивают переработку внешнеторгового грузопотока на участках пограничных переходов с Китаем (Гродеково – Суйфэньхэ, Нижнеленинское – Тунцзян и Камышовая – Хуньчунь) и транспортных узлов (Владивосток, Находка, Ванино). Станции, расположенные в зоне промышленных узлов, осуществляют обслуживание различных добывающих предприятий, в том числе организаций, функционирующих в рамках созданных территорий опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР) – ТОР «Хабаровск», «Находка», «Приморье», «Амурская» и т. д. За первые 6 месяцев 2024 года на участках ДВЖД погрузка составила 38 млн т, что на 2 % выше показателя 2023 года [5]. Из табл. 1 видно, что наибольшая доля погрузки приходится на ресурсодобывающие субъекты и регионы с развитой пограничной и портовой инфраструктурой.

Таблица 1

Объемы погрузки на участках ДВЖД за 2023 год с учетом регионального расположения

Регион	Объем погрузки, млн т	Доля, %
Приморский край	22,7	31
Хабаровский край	21,7	30
Амурская область (в границах ДВЖД)	15,4	21
Республика Саха (Якутия)	8,5	12
Еврейская автономная область	4,3	6

На полигоне Дальневосточной железной дороги порядка 80 % грузовых операций, осуществляемых на участках МЧ, связаны с выгрузкой грузов. На грузовом дворе станции Находка операции по выгрузке грузов составляют 88 %, на станции Владивосток доля операций по выгрузке грузов составляет 72 %, также операции по погрузке преобладают на участках Гродеково и Хабаровск-2. Дисбаланс грузовых операций на участках МЧ отражает специфику внешней торговли Дальнего Востока и транспортировку значительных объемов грузопотока в адрес морских портов для отправки в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. При этом наибольший объем погрузки грузов на сети ДВЖД, в объеме 97 %, осуществляется на станциях Нерюнгри и Чегдомын, расположенных в угледобывающих северных районах. На рис. 2 представлена аналитика изменения объемов грузовой работы в зависимости от периода функционирования участков МЧ ДВЖД.

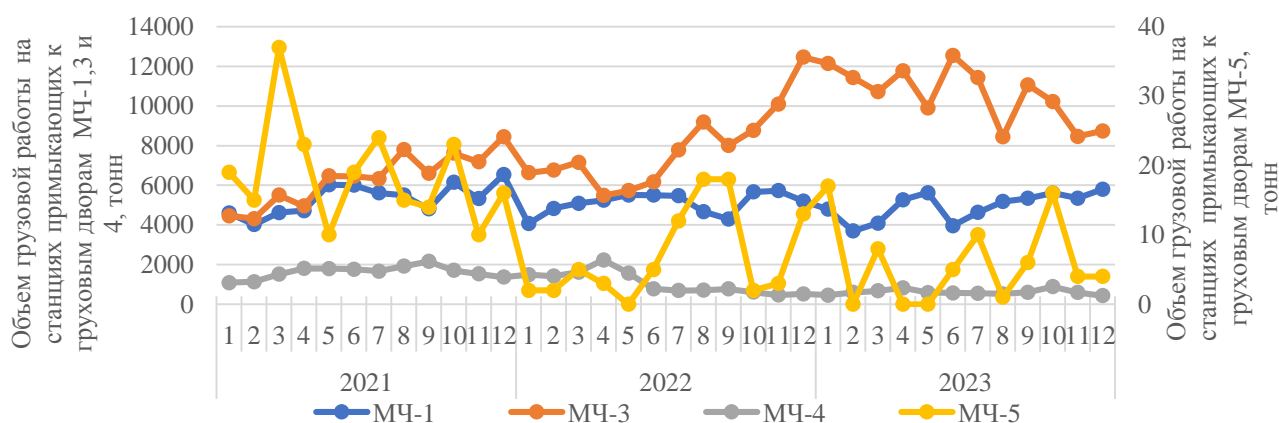


Рис. 2. Объемы грузовой работы участков МЧ ДВЖД за 2021–2023 годы:

МЧ-1 (станции Хабаровск-П, Биробиджан); МЧ-3 (станции Первая Речка, Ружино, Находка, Артем, Дальнереченск, Спасск-Дальний, Арсеньев, Новочугуевка, Гродеково, Уссурийск); МЧ-4 (станции Комсомольск-на-Амуре, Новый Ургал, Советская Гавань, Тында, Беркамит); МЧ-5 (станции Южно-Сахалинск, Ноглики, Холмск)

Анализ объемов грузовой работы участков МЧ ДВЖД показал значительные среднемесячные колебания показателей, при этом возможны изменения объемов работы в течение более короткого периода функционирования участков. На малонагруженных участках МЧ отклонение показателей грузовой работы от среднего объема переработки грузов может достигать 512 %, данное значение было зафиксировано в работе грузового двора станции Ноглики в 2023 году. Подобные отклонения показателей грузовой работы приводят к неэффективному использованию терминально-логистической инфраструктуры участка. Падение объемов работы участка МЧ приводит к непроизводительному простоям погрузо-разгрузочных машин (ПРМ), персонала и технологических зон терминалов, что отражается на экономических показателях работы МЧ. В период интенсивного поступления грузопотока для переработки на участках МЧ происходит простой транспортных средств в ожидании грузовых операций, увеличение сроков хранения грузов и времени доставки, как следствие, появление штрафных санкций и репутационных издержек, снижение клиентоориентированности и конкурентоспособности железнодорожного транспорта [6–7].

Гармонизация уровня развития перерабатывающей способности терминально-логистической инфраструктуры МЧ и объемов поступающего грузопотока позволяет обеспечить качественное транспортное обслуживание клиентов. Как правило, инфраструктурно-технические мероприятия по развитию перерабатывающей способности железнодорожных грузовых терминалов включают увеличение площади зон хранения, количества ПРМ и длины грузового фронта. Исторически грузовые объекты участков МЧ создавались за пределами городской агломерации, в настоящее время, в условиях формирования современной урбанистики и массовой застройки городского пространства, территориальное расширение грузовых терминалов МЧ является трудновыполнимой задачей, как и строительство новых терминалов с высокими капитальными вложениями [8–10]. Поэтому одним из возможных вариантов увеличения перерабатывающей способности участка МЧ может быть организация дополнительного тылового терминала. Тыловые терминалы в основном используются в качестве буферных складских зон морских портов и включают «сухие порты», железнодорожные порты. В Концепции создания терминально-логистических центров на терри-

тории Российской Федерации предложена еще одна категория вспомогательных терминалов в виде спутника, который является удаленным грузовым объектом терминально-логистического центра (ТЛЦ) и связан с ним единой технологией переработки грузопотоков, в том числе спутник может быть специализирован под определенный тип груза. Целью терминала типа спутник является расширение функционала ТЛЦ за счет переработки грузопотока на спутнике, который нецелесообразно или невозможно обслуживать на объектах ТЛЦ, а также предоставления услуг клиентам удаленно от ТЛЦ. Организация терминала типа спутник связана с большими капитальными вложениями, обоснованием целесообразности строительства, выбора места и оснащения терминала. При этом меняющаяся конъюнктура рынка логистических услуг затрудняет долгосрочное прогнозирование по развитию грузовой базы и клиентского сервиса в регионе, что несет серьезные риски для инвестора [11–13].

Перспективной технологией увеличения перерабатывающей способности грузовых терминалов участка МЧ может стать организация тылового терминала-демпфера, или демпфирующего терминала. *Терминалы-демпферы* – это объекты терминально-логистической инфраструктуры, используемые МЧ для временной организации мест общего пользования. Целью данного терминала является снижение влияния негативных факторов колебаний объемов грузопотока на функционирование грузовых объектов МЧ путем организации мест выполнения грузовых и складских операций для ускорения процессов переработки транспортных и грузовых потоков. Основным отличием терминала-демпфера от других групп терминалов является возможность изменения места дислокации используемого терминально-логистического объекта для выполнения грузовой работы. Расположение терминала-демпфера возможно на пристанционной территории, имеющей законсервированные объекты, или на площадках путей необщего пользования, примыкающих к рассматриваемой станции. В табл.2 приведены отличительные особенности ТЛЦ, терминала-спутника и демпферного терминала.

Таблица 2

Сравнительная характеристика терминалов

Критерий	Вид терминала		
	ТЛЦ	Терминал-спутник	Терминал-демпфер
Вид воздействия	Управляющий	Зависимый	Зависимый
Период функционирования	Постоянное	Постоянное	Временное/Постоянное
Вид груза	Широкая номенклатура	Определенный тип груза	Широкая номенклатура
Техническое оснащение	Стационарное	Стационарное	Мобильное
Капитальные вложения	Максимальные	Средние	Минимальные
Эксплуатационные затраты	Минимальные	Минимальные	Средние
Цель функционирования	Предоставление большого количества логистических услуг	Расширение логистических услуг основного терминала	Оптимизация функционирования основного терминала в периоды пиковых нагрузок

Терминал-спутник и терминал-демпфер являются вспомогательными структурно-функциональными объектами основного управляющего терминала – ТЛЦ, железнодорожный грузовой терминал. В условиях нестабильной загрузки терминальной сети железнодорожного полигона использование технологии терминала-демпфера позволит оптимизировать работу технологических линий в сгущенный период поступления грузопотока и минимизировать время простоя транспортных средств на объектах МЧ, исключить штрафы за задержку доставки и выдачи грузов в пунктах прибытия, что положительно скажется на показателях работы железнодорожного транспорта.

Терминал-демпфер выполняет ограниченный перечень функций участка МЧ. Операции, связанные с обслуживанием клиентов, планированием и организацией работы, выполняются МЧ. Терминал-демпфер является дополнительной территорией рассматриваемого грузового объекта МЧ с размещением необходимой производственной инфраструктуры для увеличения перерабатывающей способ-

ности. Эффективность организации терминала-демпфера заключается в оперативном подборе необходимого грузового объекта и коротких сроках ввода в действие инфраструктуры для переработки прибывающего грузопотока. Предпосылки для организации терминала-демпфера представлены на рис. 3.



Рис. 3. Предпосылки организации терминала-демпфера

В условиях инфраструктурно-технологических ограничений и интенсивного поступления грузопотоков в адрес участка МЧ возникают сверхнормативные простои железнодорожных и автомобильных транспортных средств в ожидании грузовых операций, поэтому для принятия решения о перенаправлении груза с участка МЧ на терминал-демпфер необходимо учитывать производственные мощности рассматриваемого терминала: перерабатывающую способность складских объектов, длину грузового фронта и технико-эксплуатационные характеристики используемых ПРМ, а также резервы пропускной способности участка примыкания железнодорожной инфраструктуры к терминалу-демпферу [14–15]. В данной работе рассматривается задача выбора грузового терминала для перенаправления части грузовой работы с участка МЧ на терминал-демпфер. Транспортно-технологические схемы движения грузопотока представлены на рис. 4.

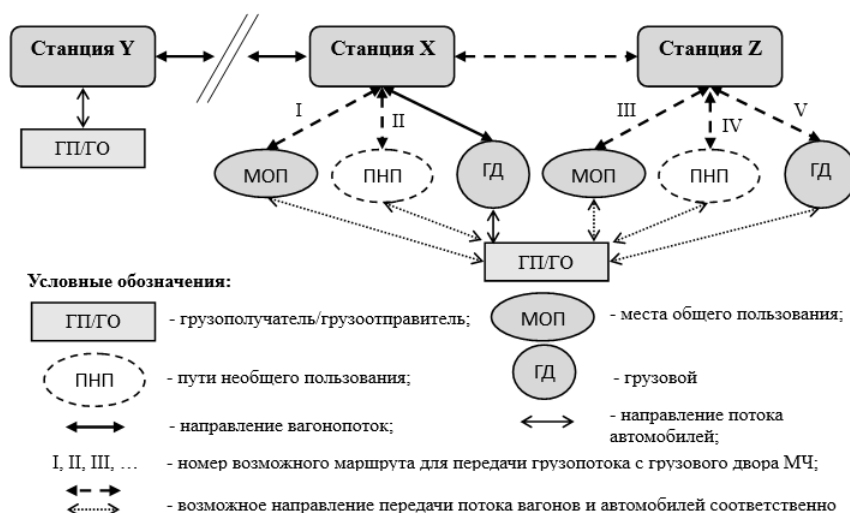


Рис. 4. Транспортно-технологические схемы движения грузопотока при организации терминала-демпфера

Использование объектов терминально-логистической инфраструктуры железнодорожной транспортной системы в качестве вспомогательных терминалов-демпферов для повышения перерабатывающей способности участков МЧ, качества обслуживания и клиентоориентированности, требует

экономического обоснования и разработки механизма принятия решения. Авторами разработан алгоритм выбора объекта терминально-логистической инфраструктуры для организации терминала-демпфера, представленный на рис. 5.

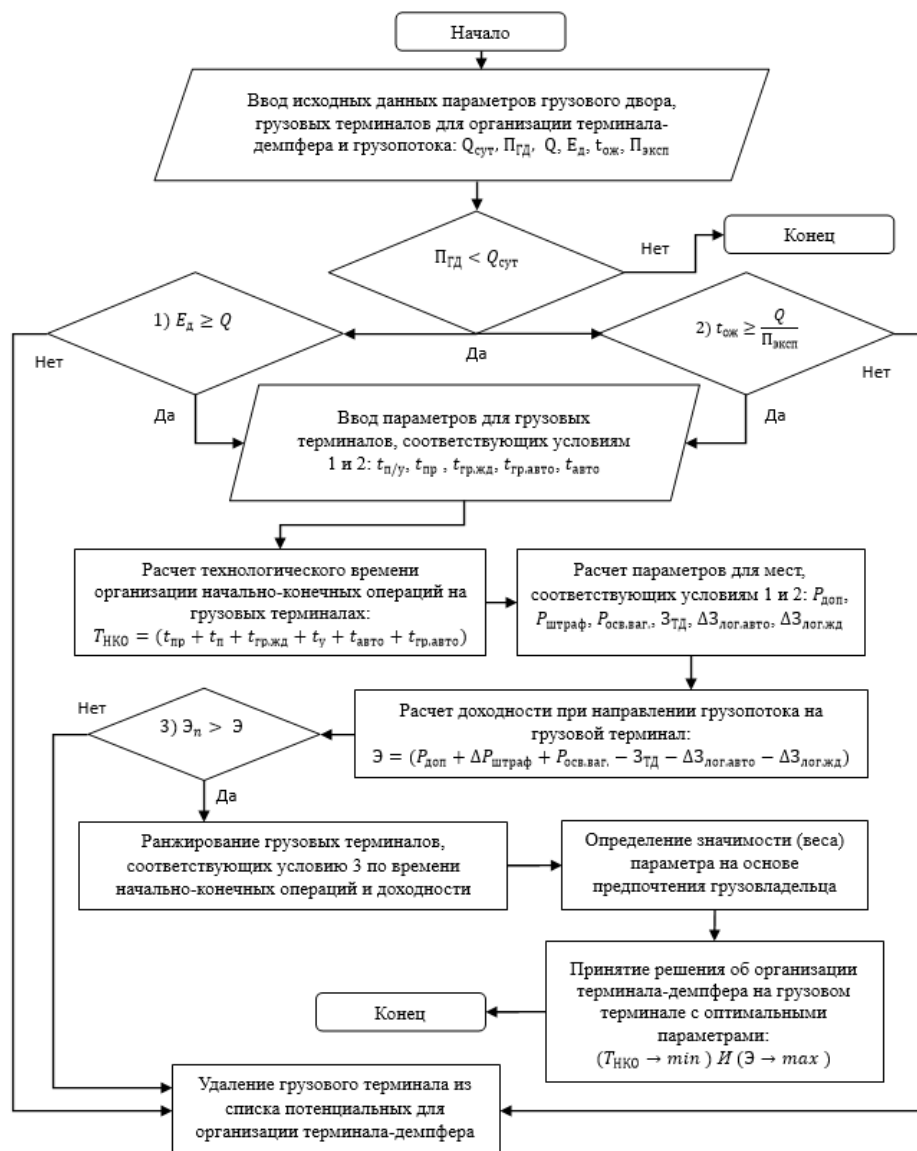


Рис. 5. Алгоритм определения объекта терминально-логистической инфраструктуры железнодорожной транспортной системы для организации терминала-демпфера:

$P_{ГД}$ – перерабатывающая способность грузового двора, т/сут; $Q_{сут}$ – суточный грузопоток грузового двора, т/сут; E_d – доступная емкость склада, т; Q – объем передаваемого грузопотока, т; $t_{ож}$ – время простоя ПРМ в ожидании груза, ч; $P_{эксп}$ – эксплуатационная производительность ПРМ, т/ч; $t_{п/у}$ – время подачи-уборки подвижного состава, ч; $t_{пр}$ – время простоя вагонов на станции в ожидании освобождения грузового фронта, ч; $t_{гр.жд}$, $t_{гр.авто}$ – время грузовых операций на ж.-д. и авто соответственно; $t_{авто}$ – время подачи авто; Δ – экономический показатель, определяющий доходность передачи грузопотока на грузовой терминал; $P_{доп}$ – прибыль от привлечения дополнительного грузопотока, руб.; $\Delta P_{штраф}$ – разница в затратах на выплату штрафов за просрочку доставки, руб.; $P_{осв.ваг}$ – дополнительная прибыль от увеличения оборачиваемости вагонов, руб.; $\Delta Z_{ТД}$ – затраты на организацию терминала-демпфера, руб.; $\Delta Z_{лог.авто}$, $\Delta Z_{лог.жд}$ – разница в логистических затратах на автомобильном и ж.-д. транспорте, возникающая при изменении пункта выдачи груза грузополучателю, руб.

При выборе объекта терминально-логистической инфраструктуры для организации терминала-демпфера осуществляется проверка условий достаточности технического оснащения для приема и переработки грузопотока, производится сравнение временных параметров начально-конечных операций ($T_{НКО}$), что оказывает влияние на продолжительность транспортного процесса, и соответственно, эффективность логистической цепи [16–17]. Завершающим этапом является сравнение экономических показателей вариантов организации грузовой работы в пункте назначения (Э). Грузовой терминал с наибольшим показателем экономической целесообразности с учетом обеспечения ускорения продвижения грузопотока является оптимальным для организации терминала-демпфера.

В качестве примера реализации алгоритма в работе рассмотрена перевозка тарно-штучного груза в полувагонах объемом 528 т, станция отправления Челябинск-Грузовой, станция назначения Хабаровск II, с выгрузкой на грузовом дворе. В процессе перевозки груза на грузовом дворе пункта назначения происходит технологический сбой и предполагается задержка выгрузки груза до 8 суток. С учетом месторасположения склада грузополучателя в городе Хабаровске были подобраны грузовые терминалы различной технической оснащенности: грузовой терминал компании FESCO, грузовой терминал, расположенный в промышленном районе города Хабаровска и грузовой двор станции Биробиджан. Этапность и основные результаты расчетов для принятия решения по выбору грузового терминала для организации терминала-демпфера сведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка параметров объектов терминально-логистической инфраструктуры для организации терминала-демпфера

№ этапа	Наименование этапа	Грузовой терминал			
		МЧ Хабаровск	МЧ Биробиджан (требуемое/факт.)	FESCO Хабаровск (требуемое/факт.)	ПНП Хабаровск (требуемое/факт.)
1	Проверка доступности складских площадей, т	Нехватка перерабатывающей способности.	528 < 756	528 < 14400	528 < 3600
2	Срок доставки груза	Задержка 8 суток	22	20	21
3	Сокращение затрат при передаче грузопотока, тыс. руб.	Упущенный доход: 446,9 тыс. руб.	51,1	302,3	236

Организация терминала-демпфера на территории компании FESCO позволит обеспечить сокращение времени простоя вагонов на станции в ожидании подачи на грузовый двор, повышение оборачиваемости подвижного состава, снижение штрафов за просрочку доставки груза, при этом доставка груза автомобильным транспортом на грузовой терминал FESCO имеет сопоставимые затраты относительно доставки груза на грузовый двор станции Хабаровск. Как видно из табл. 2, убытки от задержки выгрузки на грузовом дворе Хабаровска составляют 446,9 тыс. рублей. При передаче грузопотока на грузовой терминал FESCO происходит сокращение затрат на 302,3 тыс. руб., что является экономически эффективной технологией для ОАО «РЖД». Для организации терминала-демпфера дополнительно необходимо учитывать возможность внеплановых поставок, уровень информатизации основных систем учета, контроля и коммуникации, а также другие параметры, влияющие на возможность беспрепятственной передачи грузопотока и степень удовлетворенности услугами, предоставляемыми ОАО «РЖД».

Выводы

Колебания грузопотоков в транспортной системе приводят к неэффективному использованию объектов терминально-логистической инфраструктуры, обладающих низким уровнем гибкости и адаптации к изменяющимся условиям. Чрезмерная загруженность производственных линий грузовых терминалов приводит к убыткам, связанным со сроками доставки грузов, простоем транспортных средств и репутационными издержками перевозчика. Отсутствие объемов грузопереработки влияет на увеличение простоя ПРМ и доли эксплуатационных затрат относительно прибыли. Механизмом повышения адаптивности терминально-логистической инфраструктуры и снижение негативного воздействия пиковых объемов грузовой работы является использование терминалов-демпферов, как базы для оперативного увеличения перерабатывающей способности с минимальными капитальными вложениями.

Представленная в работе методика выбора грузового терминала для передачи грузопотока позволяет минимизировать риски, связанные с ограничением уровня перерабатывающей способности терминально-логистической инфраструктуры железнодорожной транспортной системы, с помощью перераспределения грузового и транспортного потоков между альтернативными пунктами грузовой работы. Основными задачами, которые решаются при использовании данной методики, являются сокращение затрат ОАО «РЖД», возникающих при невозможности осуществления грузовых операций в местах погрузки или выгрузки, улучшение качества транспортного обслуживания клиентов, в том числе за счет сокращения сроков доставки, а также сокращение простоя транспортных средств в ожидании грузовых операций и сокращение времени оборота вагонов. Решение перечисленных задач на Дальневосточном полигоне железных дорог особенно актуально в связи с ростом объемов перевозки грузов и ускоренным развитием транспортной инфраструктуры, что приведет к дополнительному увеличению загруженности основных участков грузовой работы региона.

Для принятия решения о перенаправлении объемов грузовой работы на терминал-демпфер и соответствующей экономической оценке, а также о выборе места организации терминала-демпфера необходима разработка имитационной модели, учитывающей реальные параметры объектов терминально-логистической инфраструктуры рассматриваемого региона.

Список литературы

- 1 **Покровская, О. Д.** Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 80–94. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94.
- 2 Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.
- 3 Экономическая конъюнктура в Дальневосточном федеральном округе в 2023 г. / О. М. Прокапало, А. Б. Бардаль, А. Г. Исаев, М. Г. Мазитова // Пространственная экономика. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 122–166. – DOI 10.14530/se.2024.2.122-166.
- 4 Грузоперевозки по Восточному полигону к 2030 году увеличатся до 230–250 млн тонн в год // Информационное агентство ТАСС : [сайт]. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/15983511> (дата обращения: 28.08.2024).
- 5 **Парыгина, Д. В.** Источники синергии мультимодальных транспортных узлов Дальнего Востока России / Д. В. Парыгина, В. В. Буровцев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (69). – С. 49–55. – DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_49.
- 6 **Король, Р. Г.** Моделирование пропускной способности пограничных переходов транспортного коридора «Приморье-1» в условиях увеличения грузопотока / Р. Г. Король, А. С. Акельев // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 97–106. – EDN NSMTPS.

References

- 1 **Pokrovskaya, O. D.** Logistics transport systems of Russia under new sanctions / O. D. Pokrovskaya // Bulletin of scientific research result. – 2022. – No. 1. – P. 80–94. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-80-94.
- 2 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy / E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.
- 3 Economic situation in the Far Eastern federal district in 2023 / O. M. Prokapalo, A. B. Bardal, A. G. Isaev, M. G. Mazitova // Spatial economics. – 2024. – Vol. 20, No. 2. – P. 122–166. – DOI 10.14530/se.2024.2.122-166.
- 4 Cargo transportation along the Eastern Polygon will increase to 230–250 million tons per year by 2030// TASS, Russian news agency : [website]. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/15983511> (date of access: 08/28/2024).
- 5 **Parygina, D. V.** Synergy sources of multimodal transport hubs of the Russian Far East / D. V. Parygina, V. V. Burovtsev // Vestnik Siberian Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2 (69). – P. 49–55. – DOI 10.52170/1815-9265_2024_69_49.
- 6 **Korol, R. G.** Modeling the capacity of border crossings of the "Primorye-1" transport corridor in conditions of increasing cargo traffic / R. G. Korol, A. S. Akeliev // Journal of Transsib railway studies. – 2023. – No. 2 (54). – P. 97–106. – EDN NSMTPS.

7 **Акельев, А. С.** Оптимизация распределения грузопотоков на полигоне ДВЖД в условиях переориентации грузов на «восточное» направление / А. С. Акельев // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2023. – Т. 1. – С. 82–87. – EDN PJTXSF.

8 **Нестерова, Н. С.** Принятие решений по этапному изменению облика и мощности мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова, В. А. Анисимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 59–67. – DOI 10.26731/1813-9108.2021.4(72).59-67.

9 **Пугачев, И. Н.** Развитие транспортно-логистического комплекса Дальневосточного региона России / И. Н. Пугачев, Р. Г. Король, Н. С. Нестерова // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2022. – № 4 (33). – С. 25–34. – EDN FANMES.

10 **Король, Р. Г.** Логистические решения по регулированию порожнего вагонопотока на Восточном полигоне железных дорог / Р. Г. Король, М. В. Нечипорук // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 107–119. – EDN YELOOD.

11 **Покровская, О. Д.** Логистика терминалов : перспективное направление логистики / О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (44). – С. 155–164. – EDN UNRRIT.

12 **Кугуелова, В. О.** Определение пропускной способности инфраструктуры транспортных коридоров / В. О. Кугуелова, Р. Г. Король // Экономика, инновации и научные исследования в транспортном комплексе региона: проблемы и перспективы развития : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Хабаровск, 2017. – С. 161–167. – EDN YWLTEY.

13 **Крылова, А. В.** Использование метода имитационного моделирования для оптимизации работы грузовых терминалов в транспортно-логистических комплексах / А. В. Крылова // Инновационное развитие транспорта : материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – Санкт-Петербург : КУЛЬТ-ИНФОРМ-ПРЕСС, 2016. – С. 170–173. – EDN XOMAPJ.

14 **Москвичев, О. В.** Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня / О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева // Вестник

7 **Akeliev, A. S.** Optimization of the distribution of cargo flows at the Far Eastern railway polygon in the conditions of reorientation of cargo to the "eastern" direction / A. S. Akeliev // Scientifically technical and economical cooperation in Asia-Pacific countries in the 21st century. – 2023. – Vol. 1. – P. 82–87. – EDN PJTXSF.

8 **Nesterova, N. S.** Decision-making to gradually change the appearance and capacity of the multimodal transport network / N. S. Nesterova, V. A. Anisimov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2021. – No. 4 (72). – P. 59–67. – DOI 10.26731/1813-9108.2021.4(72).59-67.

9 **Pugachev, I. N.** Development of transport and logistics complex of the Far Eastern regions of Russia / I. N. Pugachev, R. G. Korol, N. S. Nesterova // Transport of the Asia-Pacific region. – 2022. – No. 4 (33). – P. 25–34. – EDN FANMES.

10 **Korol, R. G.** Logistics solutions for the regulation of empty car traffic on the Eastern railway polygon / R. G. Korol, M. V. Nechiporuk // Journal of Transsib railway studies. – 2020. – No. 3 (43). – P. 107–119. – EDN YELOOD.

11 **Pokrovskaya, O. D.** Terminal logistics : promising direction for logistics / O. D. Pokrovskaya, E. K. Korovyakovsky // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2015. – No. 3 (44). – P. 155–164. – EDN UNRRIT.

12 **Kuguelova V. O.** Determining the capacity of transport corridors infrastructure / V. O. Kuguelova, R. G. Korol // Economics, innovations and scientific research in the transport complex of the region: problems and prospects of development : materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation / FESTU. – Khabarovsk, 2017. – P. 161–167. – EDN YWLTEY.

13 **Krylova, A. V.** Using the simulation modeling method to optimize the operation of cargo terminals in transport and logistics complexes / A. V. Krylova // Innovative development of transport : materials of the All-Russian Scientific Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates. – Saint Petersburg : CULT-INFORM-PRESS, 2016. – P. 170–173. – EDN XOMAPJ.

14 **Moskvichev, O. V.** System analysis of mathematical models of placement of transport and logistics facilities of different levels / O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva // Bulletin of the Research Institute of Railway Transport. – 2022. –

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81, № 3. – С. 267–276. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276.

15 **Гончарова, Н. Ю.** Использование методов имитационного моделирования в железнодорожном транспорте / Н. Ю. Гончарова, Р. Ю. Упырь, А. В. Дудакова // Мировые научные парадигмы в цифровую эпоху: взгляд в будущее : материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : Манускрипт, 2022. – Т. 2. – С. 72–75. – EDN CTQNTS.

16 Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенев [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 800–811. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.

17 **Петрова, Е. Е.** Социально-сетевой анализ зарубежных исследований в области автоматизации грузовых контейнерных перевозок / Е. Е. Петрова, В. В. Ганнесен, Т. Е. Маликова // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 79. – С. 238–249. – DOI 10.37890/jwt.vi79.491.

Vol. 81, No. 3. – P. 267–276. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276.

15 **Goncharova, N. Yu.** The use of simulation modeling methods in railway transport / N. Yu. Goncharova, R. Yu. Upyr, A. V. Dudakova // World scientific paradigms in the digital age : a look into the future : materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. – Rostov-on-Don : Manuscript, 2022. – Vol. 2. – P. 72–75. – EDN CTQNTS.

16 Configuring terminal-warehouse infrastructure of transport hub based on the development of the method of economic-geographical differentiation of cargo flows / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov [et al.] // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2022. – Vol. 19, No. 4. – P. 800–811. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.

17 **Petrova, E. E.** Social network analysis of foreign research in the field of automation of cargo container transportation / E. E. Petrova, V. V. Gannesen, T. E. Malikova // Scientific problems of water transport. – 2024. – No. 79. – P. 238–249. – DOI 10.37890/jwt.vi79.491.

A. S. Akeliev, R. G. Korol

OPTIMIZATION OF OPERATING PARAMETERS OF THE TERMINAL AND LOGISTICS INFRASTRUCTURE OF THE RAILWAY TRANSPORT SYSTEM

Abstract. The paradigm shift in the functioning of the Russian transport and logistics market, caused by the reorientation of the main flows of goods movement to the "eastern" direction, requires accelerated technological and infrastructural development of the transport system of the Far Eastern region. The railway infrastructure of the Eastern polygon is being modernized to allow the declared volumes of cargo flow, while it is necessary to ensure efficient processing of vehicles and cargo at the facilities of the terminal and logistics infrastructure. The purpose of the work is to develop solutions aimed at increasing the processing capacity of the terminal and logistics infrastructure of railway transport by structurally optimizing the network of cargo terminals, consolidating cargo flows and organizing auxiliary damper terminals. The objectives of the study include the analysis of quantitative indicators of the terminal and warehouse complex of the Far Eastern Railway, a description of the characteristics and justification of the organization of a damper terminal for the transfer of freight traffic. The subject of the study is the technological processes and infrastructural development of the terminal and logistics infrastructure of the Far Eastern Railway. Theoretical research methods are used in the work. The article is devoted to the issues of increasing the efficiency of functioning cargo terminals due to the redistribution of cargo flows between the objects of the terminal and logistics infrastructure of railway transport. The method of choosing a cargo terminal for the transfer of cargo traffic in the presence of limiting factors is proposed.

Keywords: terminal and logistics infrastructure, Far Eastern Railway, freight yards, damper terminal.

For citation: Akeliev, A. S. Optimization of operating parameters of the terminal and logistics infrastructure of the railway transport system / A. S. Akeliev, R. G. Korol // Vestnik

Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 79–89. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_79.

Сведения об авторах

Акельев Андрей Сергеевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Технология транспортных процессов и логистика»,
аспирант,
e-mail: andrei.akelev@mail.ru

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Технология транспортных процессов и логистика»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: kingkhv27@mail.ru

Information about the authors

Akeliev Andrey Sergeevich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Technology of transport processes and logistics»,
Postgraduate student,
e-mail: andrei.akelev@mail.ru

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Technology of transport processes and logistics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Chair,
e-mail: kingkhv27@mail.ru

В. В. Трапенов

КОМПЛЕКС ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ УЗЛОВЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ГРУЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ В УСЛОВИЯХ МУЛЬТИАГЕНТНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация. В связи с развитием транспортной науки на принципах цифровизации и интеллектуализации необходимы мероприятия по совершенствованию методики формирования сети узловых грузовых распределительных центров на конкурентных экономико-географических принципах размещения с учетом мультиагентности транспортного обслуживания и ее реализация посредством разработки адаптивных алгоритмов и программного комплекса. Это позволяет выполнять обработку больших массивов данных, учитывать разноразмерные принципы блочно-модульного проектирования и зонирования узловой территории. В статье рассматривается развитие экономико-географического подхода к разграничению «зон влияний» транспортно-складских объектов за счет оптимизации распределения грузопотоков согласно размерам зон обслуживания и количеству клиентов, использования алгебраических кривых высших порядков в определении конфигурации зон складского обслуживания, формирования модифицированной геометрической евклидовой модели складской сети, задания зависимостей стоимостей перевозок. Для выполнения многовариантных расчетов разработан авторский оптимизационный алгоритм, основанный на методах интегрального исчисления, и программный комплекс в среде *Mathima*. Рассмотрим пример работы программы на объекте исследования – логистической складской инфраструктуре транспортного узла «Р». Определены эффективные местоположения логистических распределительных центров на плане узла, их «зоны влияния» и прикрепление потребителей складских услуг по критерию минимума транспортных расходов.

Ключевые слова: транспортный узел, логистический грузовой распределительный центр, мультиагентность, модифицированный экономико-географический метод, «зона влияния», метод интегрального исчисления, коэффициент непрямолинейности маршрутов, оптимизационная геометрическая евклидова модель, программный комплекс.

Для цитирования: Трапенов, В. В. Комплекс проектирования сети узловых логистических грузовых распределительных центров в условиях мультиагентности транспортного обслуживания / В. В. Трапенов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 90–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_90.

Введение

Несмотря на санкционные, кризисные и неблагоприятные мировые экономико-политические воздействия, существуют положительные тенденции в развитии промышленного производства и сельхозпродукции в РФ, которые должны быть поддержаны складской составляющей. Согласно [1], «...склады являются одним из важнейших элементов логистических систем. Объективная необходимость в специально обустроенных местах для содержания запасов существует на всех стадиях движения материального потока, начиная от первичного источника сырья и кончая конечным потребителем». Известно, что отечественная практика проектирования и размещения терминалов в транспортных узлах, оставшихся в наследство от прежнего экономического уклада, изначально основывалась на типовых нормативах, что уже не отвечает современным требованиям к организации товародвижения в условиях рыночной экономики. Анализ складской сети, сложившейся еще в 80-х годах прошлого века, указывает на ряд проблем: недостаточный учет перспектив развития промышленности и социальной инфраструктуры, несоответствие пропускной способности транспортных коммуникаций, диспропорции в уровне развития узловых видов транспорта [2] и др. Исследования [4] показывают, что эти проблемы могут вызывать так называемый «разрыв» транспортной цепи, отрицательно влияющий на транспортный процесс.

Основная часть

Российский опыт проектирования и размещения логистических грузовых распределительных центров (ЛГРЦ), транспортно-складских комплексов и терминалов в транспортных узлах был накоплен в результате значительной работы, проделанной отечественными научно-исследовательскими и проектными институтами (АО «ВНИИЖТ», АО «ИЭРТ»), проектными институтами Министерства транспорта и ОАО «РЖД»), вузами России совместно с крупнейшими специалистами – учеными-транспортниками.

Отечественные научные теории и методы проектирования узловой складской сети можно укрупненно свести к решению двух задач:

– первая задача состоит в выборе типа, мощности и оптимального места расположения объектов транспортно-складской инфраструктуры с учётом региональных особенностей зарождения и поступления грузопотоков, а также технологии работы транспортной системы;

– вторая задача заключается в оптимизации существующего или проектного узлового (регионального) транспортно-складского процесса по определённым критериям (транспортная работа, приведенные расходы и др.) на основе разработанных экономико-математических моделей и методов.

Классификация моделей и методов обоснования вариантов размещения складских объектов представлена на рис. 1.

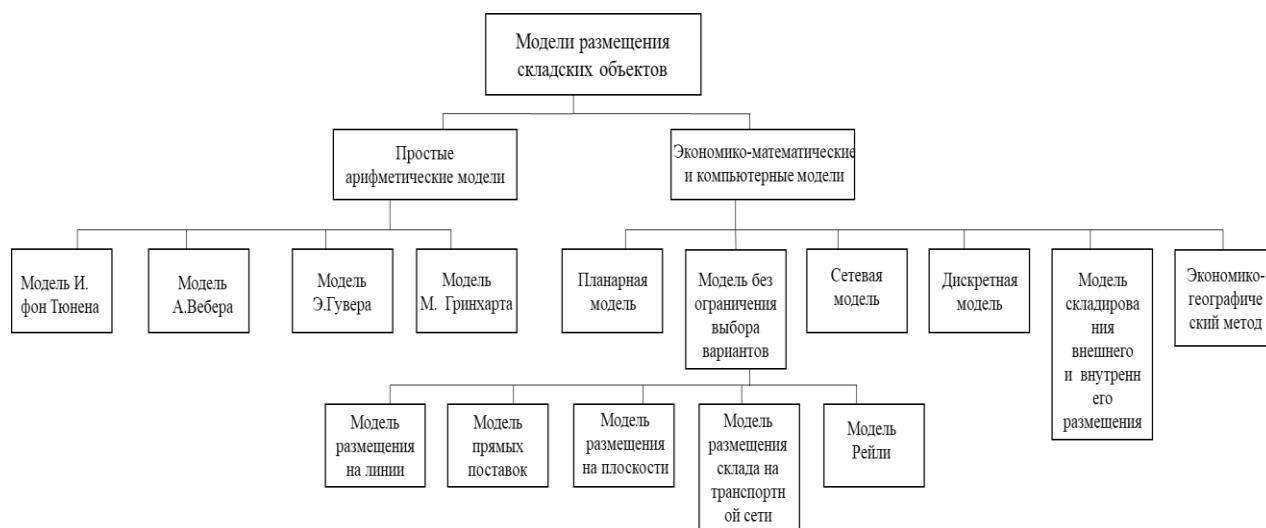


Рис. 1. Модели размещения складских объектов

Следует отметить, что однозначных и универсальных подходов в определении рациональных местоположений узловых ЛГРЦ не существует. Каждый метод эффективен в конкретных условиях применения, обусловленных географией местности, параметрами терминала, конфигурацией транспортных коммуникаций и складской инфраструктуры. Значительно сложнее в существующих моделях учитывать стоимостные параметры рыночной «мультиагентной» конкуренции и динамической системы тарифообразования, выполнять обработку больших массивов исходных и расчетных данных, учитывать разноразмерные принципы блочно-модульного проектирования и зонирования узловой территории.

В связи с этим в статье рассматривается развитие методики формирования сети узловых грузовых распределительных центров на конкурентных экономико-географических принципах размещения [5] с учетом мультиагентности транспортного обслуживания и ее реализация посредством разработки адаптивных алгоритмов и программного комплекса.

Постановка задачи: на заданной области транспортного узла, при известных количествах ЛГРЦ и потребителей, расстояниях между ЛГРЦ и потребителями (L , км), стоимостях перевозки грузов ($c(l) = p + q \cdot l$, тыс. руб.), необходимо найти такой вариант распределения грузопотоков от мест расположения ЛГРЦ до потребителей, при котором расходы на транспортировку грузов с учетом принципов мультиагентности и рыночной конкуренции будут минимальными.

$$P = \sum_{k=1}^n (p_k^{rp} + q_k^{rp} \cdot L_{ГЕМ}^*), \text{ тыс. руб. при } L_{ГЕМ}^* \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $p_k^{гр}$ – затраты на начально-конечные грузовые операции в аналитическом выражении стоимости перевозки; $q_k^{гр}$ – расходы на движенческие операции; $L_{ГЕМ}^*$ – длина участка маршрута, $k = 1 \dots n$; $j = 1 \dots m$ согласно ГЕМ сетевой модели. Ограничения: $0 \leq L_{ГЕМ}^*$; $p_k > 0$; $q_k > 0$; $k_1 \neq k_2$.

При этом учитываются такие факторы, как расстояния между ЛГРЦ и крупными клиентскими зонами, конфигурация географического распределения клиентов, местоположение источников входа-выхода узлового грузопотока, устойчивость звеньев транспортно-логистических цепей.

Для решения данной задачи применен авторский универсальный метод, который основывается на экономико-географическом разделении рыночных «зон влияния» транспортных объектов [6]. С экономической позиции рассматриваемая ситуация на рынке ЛГРЦ характеризуется, как «мультиагентность». Распределительные центры конкурируют между собой на рынке транспортно-логистических услуг, предоставляемых в конкретном регионе. Применение экономико-географического метода разделения «зон влияния» распределительных центров позволяет определить обслуживаемые территории в изучаемом регионе и, учитывая стоимость грузоперевозок, соотнести их соответствующему участнику рынка.

Разрабатываемый экономико-географический метод разделения «зон влияния» транспортно-складских объектов [5] обладает рядом преимуществ:

1 Оптимизация распределения грузопотоков помогает находить наиболее эффективные решения, разбивая потоки на части в зависимости от размеров обслуживаемых зон. Это позволяет повысить эффективность использования складских ресурсов и увеличить производительность транспортных средств.

2 Применение алгебраических кривых высших порядков обеспечивает более точный учет обслуживаемых территорий, что улучшает планирование и управление логистическими процессами.

3 Модифицированная геометрическая евклидова модель (ГЕМ) на первом этапе идеализирует транспортную сеть, предполагая прямолинейность маршрутов и использование евклидовых расстояний. На втором этапе модель адаптируется к реальным условиям, принимая во внимание фактические расстояния между узловыми точками.

4 Линейная зависимость стоимости перевозки от длины маршрута упрощает расчет моделей, что делает их удобными для быстрого практического анализа и оценки.

Для решения задачи на плоской географической карте транспортного узла вводится декартова система координат [6]. Мультиагентность включает несколько ($n > 2$) складских центров, каждый из которых находится в своей точке $O_i(x_i, y_i)$. Для каждого i -го участника ($i = 1, 2, \dots, n$) определяется стоимость начально-конечных операций p_i и стоимость движенческих операций на 1 км пути q_i . Общая стоимость доставки груза в точку $O_i(x_i, y_i)$ для i -го центра:

$$C_i(x_i, y_i) = p_i + q_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \quad (2)$$

Границы зон влияния определяются уравнениями:

$$p_i + q_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = p_j + q_j \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}. \quad (3)$$

Разграничительные линии формируют сложные сети на плоскости, отражающие конкуренцию между множеством складов. Эти линии могут принимать формы окружностей, гипербол, или более сложных кривых в зависимости от параметров.

В случае разделения «зон влияния» между первым и вторым участником (центрами распределения грузов) расстояние составляет L километров. Можно условно предположить, что их местоположение соответствует точкам $O(0, 0)$ и $A(L, 0)$. Это допущение используется для упрощения построения математической модели с применением методов аналитической геометрии. Разделение «зон влияния» данных участников будет происходить на основе стоимости транспортировки грузов от складов до пунктов назначения, которые могут находиться в любой точке исследуемой плоскости.

Обозначим p_i как стоимость начальных и конечных операций, а q_i – как стоимость перемещения на один километр для одной транспортной единицы у i -го участника (где $i = 1, 2$). Линия, разграничивающая «зоны влияния» участников, определяется неявным уравнением следующего вида:

$$p_1 + q_1 \sqrt{x^2 + y^2} = p_2 + q_2 \sqrt{(x - L)^2 + y^2}. \quad (4)$$

Следует отметить, что уравнение (4) описывает целый набор алгебраических линий второго и четвертого порядка. Существенное влияние на вид этих линий оказывают соотношения между параметрами L , p_i и q_i , ($i = 1, 2$). Рассмотрим геометрическую и логистическую интерпретацию некоторых из этих линий.

В простейших случаях, если $p_1 = p_2$ и $q_1 \neq q_2$, уравнение (4) задает окружности. Когда $q_1 = q_2$ и $p_1 \neq p_2$, в зависимости от величины L линия может быть ветвью гиперболы, прямолинейным лучом или вообще не существовать. Таким образом, в этих случаях формируются алгебраические линии второго порядка [6].

Когда у конкурирующих участников различаются как начально-конечные, так и движенические затраты, возникают более сложные линии. Например, при $p_1 > p_2$ и $q_1 < q_2$ алгебраическая линия, описанная уравнением (4), может быть линией четвертого порядка и принимать форму улитки Паскаля [6].

При этом решения зависят от множества взаимосвязанных факторов, влияющих на распределение зон влияния и ресурсов. Укрупненная блок-схема решения задачи размещения узловых ЛГРЦ представлена на рис. 2.

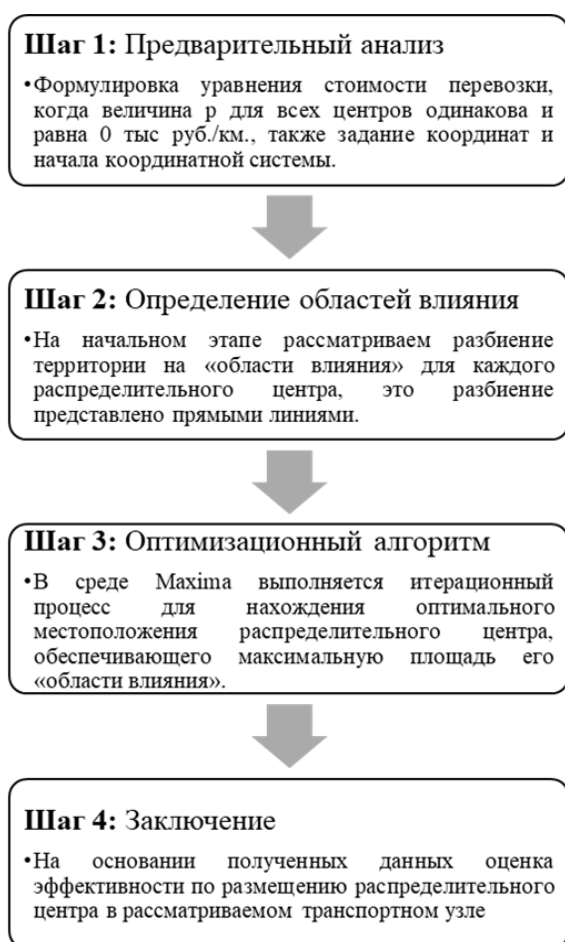


Рис. 2. Укрупненная блок-схема решения задачи размещения узловых ЛГРЦ

Для проведения многовариантных расчетов был разработан уникальный программный комплекс, реализованный в среде *Maxima*. Рассмотрим пример его работы на объекте исследования – логистической складской инфраструктуре транспортного узла «Р». Основная часть города изображена в виде эллипса, вытянутого вдоль русла реки (рис. 3), где потребители услуг ЛГРЦ распределены равномерно по всей территории. Железнодорожные грузовые перевозки осуществляются через две станции – «Р-Т» и «Р-З», а оттуда грузы доставляются автомобильным транспортом в три логистических центра: «Г», «С» и «Ю» [6]. После обработки грузы попадают в розничные торговые точки, равномерно распределённые по территории эллипса (принято 60 потребителей). ЛГРЦ также получают продукцию от различных производственных предприятий и центрального склада. Для рассматриваемого транспортного узла разрабатывается оптимизационная геометрическая евклидова модель (ОГЕМ) для грузоперевозок [5]. Основываясь на методах интегрального исчисления, оптимизационный алгоритм позволяет вычислить новое оптимальное местоположение центра. Все расчеты выполняются в среде *Maxima* с использованием её аналитических и графических возможностей [6]. Важно отметить, что при условии $p_1 = p_2$ и $q_1 = q_2$ в уравнениях (3, 4) «зоны влияния» участников будут разграничены прямой линией, проходящей через точку $x = \frac{L}{2}$.

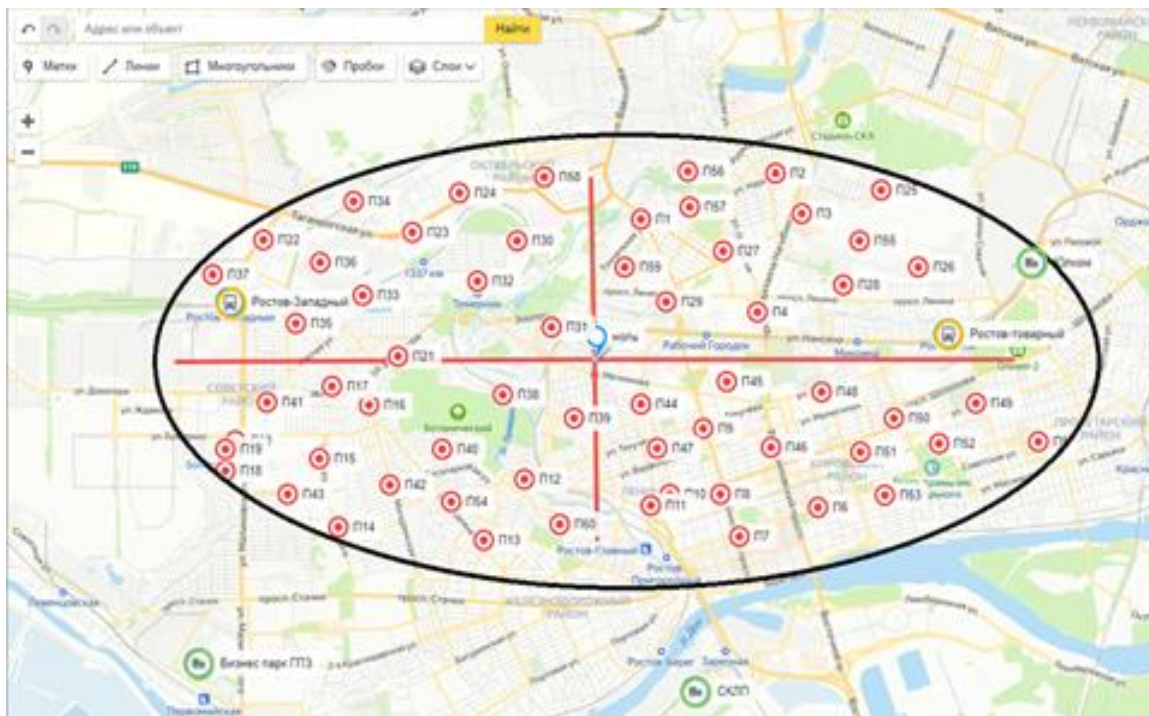


Рис. 3. Программная интерпретация схемы транспортного узла «Р»

Далее приведены исходные программные преобразования уравнений (3, 4).

Определение «зоны влияния» дугами между ЛГРЦ «Г» и «С»:

```
>Curves_1_2:=implicitplot([1000+1.53*1000*sqrt((x-a1)^2+(y-b1)^2)=1000+1000*sqrt((x-a2)^2+(y-b2)^2)], x=-10..10,y=-10..10, thickness=[6],color=[black], numpoints=19000000):
```

$$1000 + 1000\sqrt{(x - a1)^2 + (y - b1)^2} = 1000 + 1,53 \cdot 1000\sqrt{(x - a2)^2 + (y - b2)^2}.$$

Определение «зоны влияния» дугами между ЛГРЦ «Г» и «Ю»:

```
>Curves_1_3:=implicitplot([1000+1.76*1000*sqrt((x-a1)^2+(y-b1)^2)=1000+1000*sqrt((x-a3)^2+(y-b3)^2)], x=-10..10,y=-10..10, thickness=[5],color=[black], numpoints=19000000):
```

$$1000 + 1000\sqrt{(x - a1)^2 + (y - b1)^2} = 1000 + 1,76 \cdot 1000\sqrt{(x - a3)^2 + (y - b3)^2}.$$

Определение «зоны влияния» дугами между ЛГРЦ «С» и «Ю»:

```
>Curves_2_3:=implicitplot([1000+1.7*1000*sqrt((x-a2)^2+(y-b2)^2)=1000+1000*sqrt((x-a3)^2+(y-b3)^2)], x=-10..10,y=-10..10, thickness=[4],color=[black], numpoints=19000000):
```

$$1000 + 1000\sqrt{(x - a2)^2 + (y - b2)^2} = 1000 + 1,7 \cdot 1000\sqrt{(x - a3)^2 + (y - b3)^2}$$

В табл. 1 представлены результаты первой и двух финальных итераций оптимизационного алгоритма, выполненного в среде *Maxima*. Эти данные иллюстрируют процесс разделения городской территории на «зоны влияния» трёх логистических центров (ЛГРЦ) между «Г» и «С», «Г» и «Ю», а также «С» и «Ю», границы разделения обозначены прямыми, a , b и c соответственно.

Таблица 1

Итерации оптимизационного алгоритма и «зон влияния» ЛГРЦ

№ итераций	Координаты положения ЛГРЦ «Ю»		Площадь ЛГРЦ, км ²			Описание изменений	Визуальное представление итерации
			«Г»	«С»	«Ю»		
	<i>x</i>	<i>y</i>					
1	8	1,6	22,41	36,2	16,7	Разбиение территории узла, когда положение ЛГРЦ «Ю» за пределами основной застройки	
8	5	1,6	22,41	24,8	28,08	Разбиение территории, когда положение ЛГРЦ «Ю» на границе основной застройки	
9	5	1,2	22,4	23,7	29,2	Разбиение территории, когда положение ЛГРЦ «Ю» внутри основной застройки	

Полученные данные показывают, что оптимальная позиция ЛГРЦ «Ю» определяется координатами $x = 5$ км и $y = 1,2$ км. В этом разделении «зона влияния» данного центра занимает часть внутренней области эллипса, находящуюся справа от прямой v , с площадью 29,2 км². Заключительная итерация оптимизации проводится с условием максимального приближения точки пересечения линий a , b и v к границе эллипса. Важно подчеркнуть, что согласно методу экономико-географического разграничения «зон влияния» погрузочных станций и принципу транзитивности, три линии a , b и v должны пересекаться в одной точке [6].

В программной реализации модели распределения складских грузопотоков на территории транспортного узла «Р», возникающих в результате функционирования рассматриваемых ЛГРЦ, учитывается коэффициент непрямолинейности $K_{\text{непр}}$ маршрутов для каждого потребителя. Этот коэффициент представляет собой отношение кратчайшего расстояния по автодороге $L_{\text{кр}}$ к евклидову расстоянию $L_{\text{евк}}$. Средний коэффициент непрямолинейности $K_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\text{непр},i}$ является важным показателем, который позволяет обобщить данные для группы потребителей и получить усредненное значение для оценки системы грузораспределения. Диаграмма коэффициентов непрямолинейности маршрутов потребителей представлена на рис. 4.

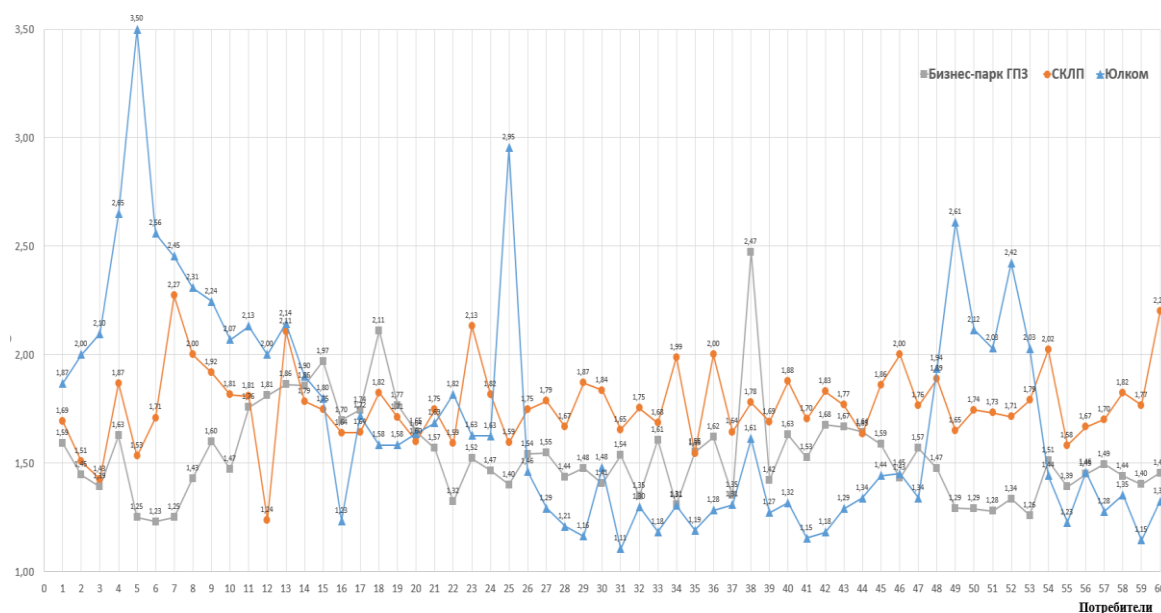


Рис. 4. Диаграмма коэффициентов непрямолинейности маршрутов

После вычислений $K_{ср}$ получено: коэффициенты непрямолинейности для ЛГРЦ «Г», «С» и «Ю» соответственно равны $k_{Г} = 1,53$, $k_{С} = 1,76$ и $k_{Ю} = 1,70$. Этот показатель дает представление о средней степени отклонения фактических маршрутов от прямых расстояний для потребителей, обслуживаемых ЛГРЦ.

Программные преобразования уравнений (3, 4) с учетом коэффициентов непрямолинейности для трех ЛГРЦ представлены ниже.

Определение «зоны влияния» дугами между ЛГРЦ «Г» и «С»:

```
>Curves_1_2:=implicitplot([1000+1.53*1000*sqrt((x-a1)^2+(y-b1)^2)=1000+1000*sqrt((x-a2)^2+(y-b2)^2)], x=-10..10,y=-10..10, thickness=[6],color=[black], numpoints=19000000):
```

$$1000 + 1000\sqrt{(x - a1)^2 + (y - b1)^2} = 1000 + 1,53 \cdot 1000\sqrt{(x - a2)^2 + (y - b2)^2}.$$

Определение «зоны влияния» дугами между ЛГРЦ «Г» и «Ю»:

```
>Curves_1_3:=implicitplot([1000+1.76*1000*sqrt((x-a1)^2+(y-b1)^2)=1000+1000*sqrt((x-a3)^2+(y-b3)^2)], x=-10..10,y=-10..10, thickness=[5],color=[black], numpoints=19000000):
```

$$1000 + 1000\sqrt{(x - a1)^2 + (y - b1)^2} = 1000 + 1,76 \cdot 1000\sqrt{(x - a3)^2 + (y - b3)^2}.$$

Определение «зоны влияния» дугами между ЛГРЦ «С» и «Ю»:

```
>Curves_2_3:=implicitplot([1000+1.7*1000*sqrt((x-a2)^2+(y-b2)^2)=1000+1000*sqrt((x-a3)^2+(y-b3)^2)], x=-10..10,y=-10..10, thickness=[4],color=[black], numpoints=19000000):
```

$$1000 + 1000\sqrt{(x - a2)^2 + (y - b2)^2} = 1000 + 1,7 \cdot 1000\sqrt{(x - a3)^2 + (y - b3)^2}.$$

Ввиду того что программный комплекс задействует вычислительные ресурсы ЭВМ, для повышения точности расчетов площадей «зон влияния» распределительных центров был применен метод Монте-Карло, заменяющий классическое интегральное исчисление, характерное для ручных расчетов. При этом, согласно выполненным аналитическим и геометрическим построениям, в качестве границ, разделяющих «зоны влияния» ЛГРЦ, используются дуги окружностей, а не прямые линии.

Для качественной обработки больших объемов данных, проведения статистического анализа и визуализации результатов узловых компоновочных решений, в программном комплексе использованы библиотеки языка программирования Python: sys, os, ssl, subprocess, time, pprint, requests, ctypes, zipfile, urllib.request, json, pathlib, matplotlib.figure, math, numpy, PyQt5, matplotlib.pyplot.

Ниже приведены рабочие окна программного комплекса по определению мест размещения узловых ЛГРЦ по вариантам транспортного обслуживания. Рассмотрены частные случаи, когда грузы попадают в распределительные центры ЛГРЦ «Г», «С» и «Ю» с грузовой станции «Р-3» или только с

грузовой станции «Р-Т», или с двух грузовых станций, а также возможные варианты разбиения «зон влияния» в случае мультиагентности между ЛГРЦ узла (рис. 5). То обстоятельство, что расстояния от железнодорожной станции до каждого из центров являются различными, стоимость соответствующей перевозки включена в аддитивную составляющую p формулы транспортных расходов. Значения коэффициента p для указанных распределительных центров равны соответственно 10,5, 14,6 и 17,7 тыс. руб.

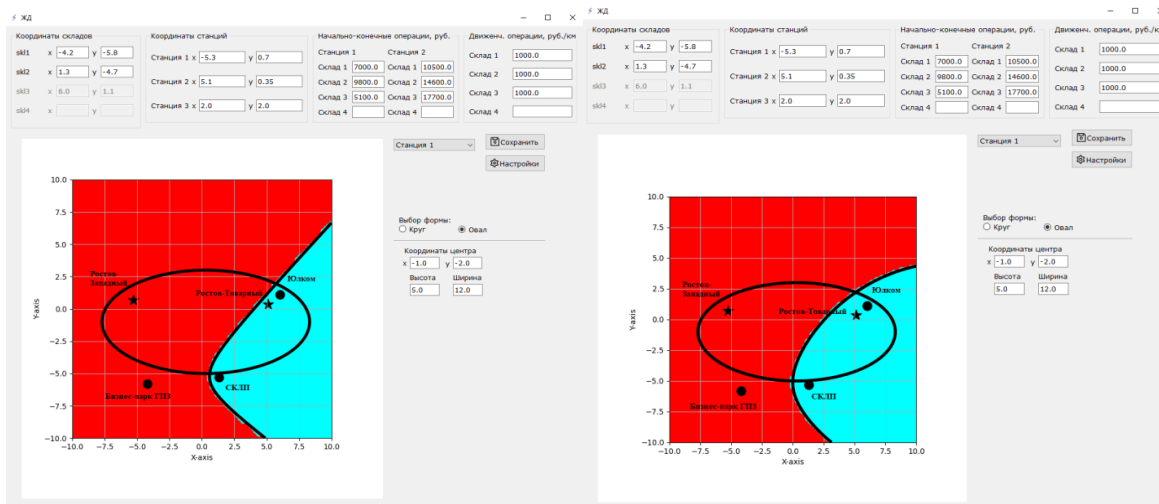


Рис. 5. «Зоны влияния» ЛГРЦ «Г» (красный цвет) и ЛГРЦ «С» (голубой цвет) при поступлении груза с железнодорожной станции «Р-З» (первая и последняя итерация)

Программный расчет случая, когда грузы попадают в центры «Г», «С» и «Ю» только с железнодорожной станции «Р-Т» представлен на рис. 6. Значения коэффициента p для указанных центров в этой ситуации приняты равными соответственно 17,0, 9,8 и 5,1 тыс. руб., коэффициенты непрямолинейности не меняются.

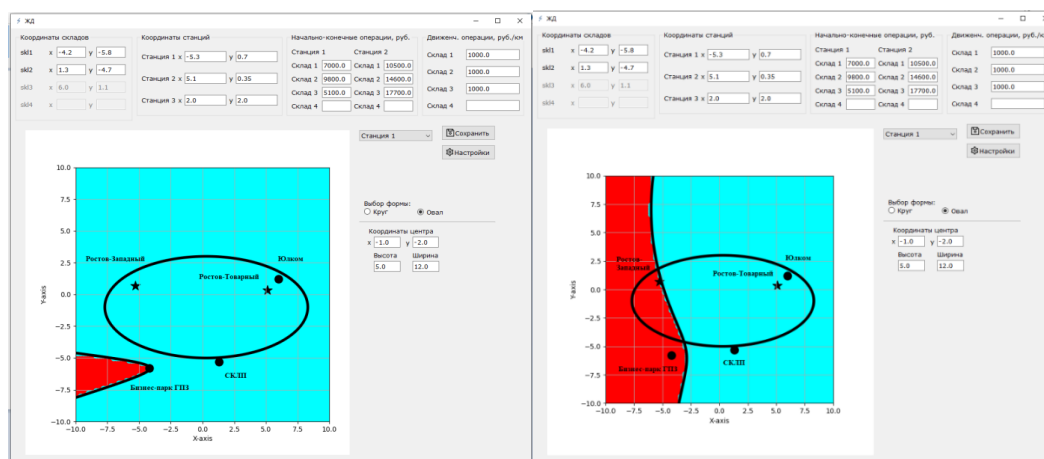


Рис. 6. «Зоны влияния» ЛГРЦ «Г» (красный цвет), ЛГРЦ «С» (голубой цвет) при поступлении груза с железнодорожной станции «Р-Т» (первая и последняя итерация)

Важно отметить, что в рассматриваемом случае ветвь гиперболы, предназначенная для разделения «зон влияния» «Г» и «С», располагается за пределами эллипса узла. В результате вся плоскость, включая внутреннюю часть эллипса, оказывается в «зоне влияния» центра «С». В этой ситуации для центра «С» затраты на начальные и конечные операции значительно ниже. Далее рассматриваются возможные сценарии распределения «зон влияния» между центрами ЛГРЦ «Г» и «Ю», а также «С» и «Ю» [6].

На предпоследнем шаге программного комплекса рассмотрено разбиение всей плоскости транспортного узла «Р» на «зоны влияния» трех рассматриваемых ЛГРЦ [6] (для «Г»–«С», «Г»–«Ю» и

«С»–«Ю», когда грузы поступают со станции «Р-3» (рис. 7) или станции «Р-Т»), а также со всех станций узла (рис. 8). Следует отметить, что в программе предусмотрена возможность изменения формы плоскости узла, а также всех исходных данных о координатах (местах поступления грузов и положениях центров распределения). Из рис. 8 следует вариант мультиагентности транспортного обслуживания рынка складских услуг, когда грузы попадают в распределительные центры с нескольких железнодорожных станций узла. При этом разбиение представляет собой территориальное выражение соответствующей конкурентной среды, создаваемой центрами ЛГРЦ «Г», «С» и «Ю» при комбинировании результатов, полученных выше.

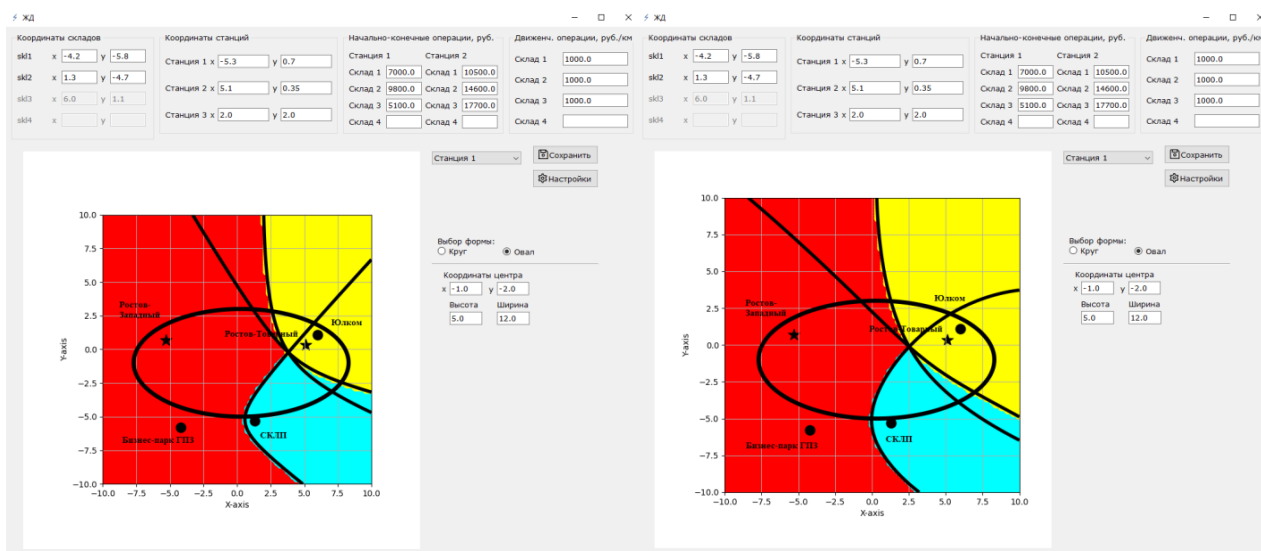


Рис. 7. «Зоны влияния» ЛГРЦ «Г» (красный цвет), ЛГРЦ «С» (голубой цвет), ЛГРЦ «Ю» (желтый цвет) при поступлении груза с железнодорожной станции «Р-3» (первая и последняя итерация)

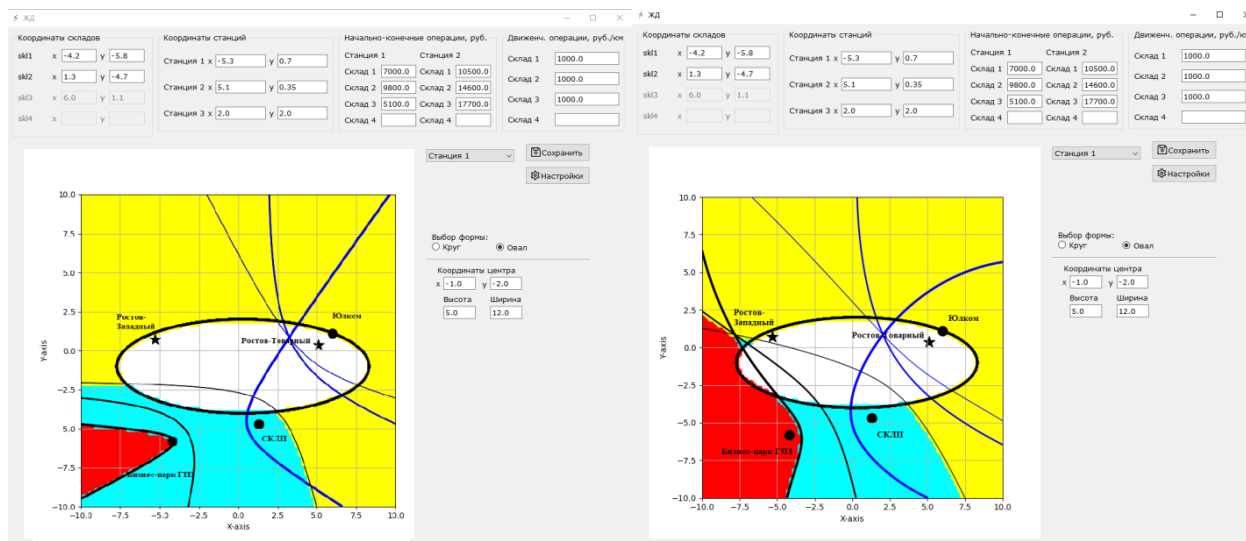


Рис. 8. «Зоны влияния» ЛГРЦ «Г» (красный цвет), ЛГРЦ «С» (голубой цвет), ЛГРЦ «Ю» (желтый цвет) при поступлении груза с обеих железнодорожных станций узла (первая и последняя итерация)

По каждому варианту определения «зон влияния» ЛГРЦ при мультиагентном обслуживании определяются транспортные расходы и прикрепление потребителей складских услуг к конкретному ЛГРЦ. Величины расходов рассчитываются в программе для однократного полурейса при обслуживании клиентов грузовыми автомобилями грузоподъемностью до 5 т (табл. 2).

Таблица 2

Стоимости транспортного обслуживания потребителей (тыс. руб.) в зависимости от «зоны влияния» ЛГРЦ и вариантов поступления грузов

Количество потребителей	ЛГРЦ «Г»		ЛГРЦ «С»		ЛГРЦ «Ю»		Оптимальный вариант
	ст. «Р-Т»	ст. «Р-3»	ст. «Р-Т»	ст. «Р-3»	ст. «Р-Т»	ст. «Р-3»	
39	1408,9	1115,8	1201,8	1832,8	893,8	1416,9	ЛГРЦ «Ю» (ст. «Р-Т»)
6	170,2	125,2	90,0	141,8	135,1	180,4	ЛГРЦ «С» (ст. «Р-Т»)
15	367,8	255,1	335,9	566,6	449,6	622,8	ЛГРЦ «Г» (ст. «Р-3»)

Таким образом, при заданных параметрах складского обслуживания потребителей наиболее выгодным вариантом для большинства клиентов является ЛГРЦ «Ю» (общее количество обслуживаемых потребителей – 39, начальное поступление груза со станции «Р-Т»), ЛГРЦ «С» обслуживает шесть потребителей при поступлении грузов со станции «Р-Т», а ЛГРЦ «Г» обслуживает 15 потребителей при поступлении грузов со станции «Р-3». При одном полурейсе грузовых автомобилей к потребителям в узле развозится 300 т груза, транспортные расходы составляют 1238,9 тыс. руб.

Заключение

Результаты, полученные с помощью программного комплекса для анализа ситуаций мультиагентной рыночной конкуренции и определения «зон влияния» ЛГРЦ, отображают различные участки внутренней части эллипса (основной структуры узла, которая может изменяться). Для ЛГРЦ «Ю» площадь «зоны влияния» составляет 29,95 км²; для ЛГРЦ «С» – 19,24 км²; для ЛГРЦ «Г» – 26,21 км². Анализ показывает, что логистический терминал «Г» имеет на 16,9 % большую «зону влияния» по сравнению с ЛГРЦ «С». Кроме того, логистический терминал «Ю» обладает «зоной влияния» на 2,5 % больше, чем ЛГРЦ «Г», и на 23,5 % больше, чем ЛГРЦ «С». Созданный автором программный комплекс для определения мест расположения узловых ЛГРЦ в зависимости от вариантов транспортного обслуживания, основанный на модифицированном экономико-географическом методе, обеспечивает математически обоснованное и соответствующее реальным условиям определение «зон влияния» конкурирующих узловых ЛГРЦ на территориальном мультиагентном рынке грузоперевозок. При оптимизации распределения складских грузопотоков в транспортном узле использование геометрической маршрутизационной модели учитывает конфигурацию действующей дорожной сети. Многовариантность расчетов способствует повышению точности определения зон обслуживания всех ЛГРЦ в транспортном узле и снижению транспортных расходов на обслуживание потребителей.

Список литературы

- 1 **Гаджинский, А. М.** Логистика : учебник / А. М. Гаджинский. – Москва : Дашков и Ко, 2005. – 432 с.
- 2 Методы формирования и принципы интеллектуализации в управлении терминально-складской системой транспортного узла / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, В. В. Алабина, М. В. Бакалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 104–114. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_104.
- 3 Методика оптимального размещения баз материально-технического снабжения Госнабза СССР / Научно-исследовательский институт экономики и организации материально-технического снабжения // (НИИМС). – Москва, 1971. – 112 с.

Reference

- 1 **Gadzhinsky, A. M.** Logistics : textbook / A. M. Gadzhinsky. – Moscow : Dashkov and Co, 2005. – 432 p.
- 2 Methods of formation and principles of intellectualization in managing the terminal warehouse system of a transport hub / O. N. Chislov, V. V. Trapenov, V. V. Alabina, M. V. Bakalov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 104–114. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_104.
- 3 Methodology for the optimal placement of material and technical supply bases of the USSR State Supply Committee / Scientific Research Institute of Economics and Organization of Material and Technical Supply // (NIIMS). – Moscow, 1971. – 112 p.

4 **Числов, О. Н.** К вопросу моделирования инфраструктурно-технологического взаимодействия в транспортных узлах / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 86–91. – ISSN 1997-0722.

5 Развитие узловой терминально-складской инфраструктуры: модификация методов исследования и прогнозы / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 3. – С. 46–57. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-3-46-57.

6 Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 800–811. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.

7 Modeling of the rail freight traffic by the method of economic-geographical delimitation in the region of the South-Easter Coast of the Baltic Sea / O. Chislov, V. Bogachev, V. Zadorozhniy [et al.] // Transport Problems. – 2019. – Vol. 14, No. 2. – P. 77–87. – DOI 10.20858/tp.2019.14.2.7.

8 Развитие инфраструктуры и внедрение новых технологических решений на Северо-Кавказской железной дороге в условиях роста объемов перевозок грузов / Д. Г. Кучинский, М. Н. Климов, А. И. Краменко, В. Н. Зубков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (70). – С. 109–117. – ISSN 0201-727X.

9 **СП 42.13330.2016.** Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89 (утверждено Приказом Минстроя России от 30.12.2016 N 1034/пр). – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/14465/> (дата обращения : 24.08.2024).

10 **Числов, О. Н.** Комплексные методы рационального размещения элементов транспортно-технологических систем в железнодорожных узлах : монография / О. Н. Числов. – Ростов-на-Дону : ФГБОУ ВО РГУПС, 2009. – 294 с. – ISBN 978-5-88814-234-9.

11 **Король, Р. Г.** Проектирование динамической имитационной модели мультимодальной транспортно-логистической системы Дальнего Востока / Р. Г. Король, А. С. Акельев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона.

4 **Chislov, O. N.** On the issue of modeling infrastructural and technological interaction in transport hubs / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2023. – No. 3 (99). – P. 86–91. – ISSN 1997-0722.

5 Development of nodal terminal and warehouse infrastructure: modification of research methods and forecasts / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov [et al.] // Bulletin of Scientific Research Results. – 2023. – No. 3. – P. 46–57. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-3-46-57.

6 Configuring the terminal and warehouse infrastructure of a transport hub based on the development of the method of economic-geographical delimitation of cargo flows / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov [et al.] // Bulletin of the Saint Petersburg Transport University. – 2022. – Vol. 19, No. 4. – P. 800–811. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.

7 Modeling of the rail freight traffic by the method of economic-geographical delimitation in the region of the South-Easter Coast of the Baltic Sea / O. Chislov, V. Bogachev, V. Zadorozhniy [et al.] // Transport Problems. – 2019. – Vol. 14, No. 2. – P. 77–87. – DOI 10.20858/tp.2019.14.2.7.

8 Development of infrastructure and implementation of new technological solutions on the North Caucasian Railway in the conditions of growing freight traffic volumes / D. G. Kuchinsky, M. N. Klimov, A. I. Kramenko, V. N. Zubkov. // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 2 (70). – P. 109–117. ISSN 0201-727X.

9 **SP 42.13330.2016.** Set of rules. Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements. Updated version of SNiP 2.07.01-89 (approved by Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 30, 2016 N 1034/pr). – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/14465/> (date of access: 08/24/2024).

10 **Chislov, O. N.** Complex methods of rational placement of elements of transport and technological systems in railway junctions : monograph / O. N. Chislov. – Rostov-on-Don : RSTU, 2009. – 294 p. – ISBN 978-5-88814-234-9.

11 **Korol, R. G.** Designing a dynamic simulation model of a multimodal transport and logistics system of the Far East / R. G. Korol, A. S. Akelyev // Transport of the Asia-Pacific Region. – 2023. – No. 4 (37). – P. 43–50. – ISSN 2415-8658.

– 2023. – № 4 (37). – С. 43–50. – ISSN 2415-8658.

12 Федеральная служба государственной статистики. – URL : <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (дата обращения : 24.08.2024).

13 Технологии будущего в складской и транспортной логистике. – URL : <https://sitmag.ru/article/24855-tehnologii-budushchego-v-skladskoy-i-transportnoy-logistike> (дата обращения : 24.08.2024).

14 **Правдин, Н. В.** Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчеты) : учебное пособие / Н. В. Правдин, А. К. Головнич, Ю. И. Ефименко. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 649 с. – ISBN 978-5-89035-826-4 // УМЦ ЖДТ. – URL: <https://umczdt.ru/books/1196/39305> (дата обращения : 24.08.2024).

15 Транспорт России : Всероссийская транспортная еженедельная информационно-аналитическая газета. – URL : <http://www.transportrussia.ru> (дата обращения : 14.03.2021).

16 **Задорожний, В. М.** Развитие методов распределения порожних вагонопотоков припортовой транспортно-технологической системы в конкурентных условиях : специальность 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Задорожний Вячеслав Михайлович. – Ростов-на-Дону, 2018. – 229 с.

12 Federal State Statistics Service. – URL : <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (date of access: 08/24/2024).

13 Technologies of the future in warehouse and transport logistics. – URL: <https://sitmag.ru/article/24855-tehnologii-budushchego-v-skladskoy-i-transportnoy-logistike> (date of access: 08/24/2024).

14 **Pravdin, N. V.** Railway stations and nodes (problems, examples, calculations): textbook / N. V. Pravdin, A. K. Golovnich, Yu. I. Efimenko. – Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2015. – 649 p. – ISBN 978-5-89035-826-4. // UMTS ZhDT. – URL: <https://umczdt.ru/books/1196/39305> (date of access: 08/24/2024).

15 Transport of Russia : All-Russian transport weekly information and analytical newspaper. – URL : <http://www.transportrussia.ru> (date of access : 03/14/2021).

16 **Zadorozhny, V. M.** Development of methods for distributing empty car flows of the port transport-technological system in competitive conditions : specialty 05.22.01 "Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport" : dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences / Zadorozhny Vyacheslav Mikhailovich. – Rostov-on-Don, 2018. – 229 p.

V. V. Trapenov

THE COMPLEX OF DESIGNING A NETWORK OF NODAL LOGISTICS CARGO DISTRIBUTION CENTERS IN THE CONDITIONS OF MULTI-AGENT TRANSPORT SERVICES

Abstract. In connection with the development of transport science on the principles of digitalization and intellectualization, measures are needed to improve the methodology for forming a network of nodal cargo distribution centers based on competitive economic and geographical principles of location, taking into account multi-agency transport services and its implementation through the development of adaptive algorithms and a software package. This makes it possible to process mass data and take into account the different-sized principles of block-modular design and zoning of the nodal territory. The article considers the development of an economic and geographical approach to delimiting the “zones of influence” of transport and warehouse facilities by optimizing the distribution of cargo flows according to the size of service areas and the number of clients, the use of higher-order algebraic curves in determining the configuration of warehouse service areas, and the formation of a modified geometric Euclidean model of the warehouse network, setting dependencies of transportation costs. To perform multivariate calculations, an original optimization algorithm based on integral calculus methods and a software package in the Maxima environment have been developed. Let's consider an example of the program's operation on the object of study – the logistics warehouse

infrastructure of the transport hub "R". The effective locations of logistics distribution centers on the hub plan, their "zones of influence" and the attachment of consumers of warehouse services according to the criterion of minimum transport costs have been determined.

Keywords: transport hub, logistics cargo distribution center, multi-agency, modified economic and geographical method, "zone of influence", integral calculus method, route non-linearity coefficient, optimization geometric Euclidean model, software package.

For citation: Trapenov, V. V. The complex of designing a network of nodal logistics cargo distribution centers in the conditions of multi-agent transport services / V. V. Trapenov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 90–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_90.

Сведения об авторах

Трапенев Владимир Викторович
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Станции и грузовая работа»,
старший преподаватель,
e-mail: vladimir.trapenov@mail.ru

Information about the authors

Trapenov Vladimir Viktorovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Stations and Freight Operation»,
Senior Lecturer,
e-mail: vladimir.trapenov@mail.ru

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.465 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_103

*О. А. Ворон, В. И. Моисеев*ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ
СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ В ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ВАГОНЕ

Аннотация. Рассмотрен способ и технические устройства для продолжительного поддержания температурного режима в обогреваемом изотермическом вагоне, предназначенном для перевозок скоропортящихся пищевых продуктов. Статья является продолжением инициативных исследований авторов по разработке технических решений для типажа изотермических вагонов и крупнотоннажных контейнеров.

Предлагаемые устройства рассматриваются совместно с использованием электрообогревательных элементов и блока тепловых аккумуляторов с большой эквивалентной теплоемкостью, обеспечиваемой фазообратимыми реакциями в теплоаккумулирующем материале. В статье представлены аналитические зависимости для расчета параметров фазового перехода некоторых теплоаккумулирующих материалов, позволяющие рассчитать размеры и выбрать тип теплового аккумулятора, лучшим образом подходящего для использования его при перевозках «термоспригодных» грузов в вагоне-термосе.

Ключевые слова: скоропортящиеся пищевые продукты, изотермический вагон, тепловой аккумулятор, теплоаккумулирующий материал, система обогрева «теплый пол», грузовое помещение.

Для цитирования: Ворон, О. А. Применение тепловых аккумуляторов при перевозках скоропортящихся грузов в изотермическом вагоне / О. А. Ворон, В. И. Моисеев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 103–108. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_103.

Применяемые аббревиатуры и сокращения:

СППП – скоропортящиеся пищевые продукты (фрукты, овощи, соки, молочная продукция и др.);

ГПВ – грузовое помещение вагона для перевозки скоропортящихся продуктов;

ОИВ – обогреваемый изотермический вагон – грузовой вагон, имеющий тепловую изоляцию стен и средства электронагрева и термостабилизации ГПВ;

ТАМ – теплоаккумулирующий материал – вещество с большой эквивалентной теплоемкостью, обусловленной обратимыми фазовыми превращениями: плавление – затвердевание;

ТА – тепловой аккумулятор – емкость специальной формы, заполненной ТАМ и находящейся внутри ГПВ;

ЭНГЭЛ – электронагревательный гибкий элемент.

В России с её обширными регионами, расположенными в неблагоприятной для земледелия Северной климатической зоне, актуален вопрос об обеспечении населения разнообразными видами скоропортящихся пищевых продуктов (СППП). Это требует организации массовых продолжительных перевозок свежих, консервированных и замороженных фруктов и овощей на большие расстояния. Эти перевозки обеспечиваются специализированным изотермическим железнодорожным подвижным составом: вагонами-термосами, рефрижераторными вагонами и крупнотоннажными рефрижераторными контейнерами.

Если рыба, мясо и птица допускают охлаждение до отрицательных температур, и потому перевозятся в замороженном состоянии в рефрижераторных вагонах, то широкую номенклатуру СППП (фруктов, овощей, молочной продукции, соков и др.) доставляют, соблюдая узкий интервал положительных температур воздуха внутри ГПВ. Ни переохлаждение, ни перегрев этой продукции не допустим из-за резкого ухудшения её свойств, вплоть до полной потери кондиционности. При перевозках СППП требуется просто длительное их поддержание при положительных, но невысоких температурах.

Некоторая часть скоропортящихся грузов, которая получила название «термоспригодных», допускается к перевозкам в вагонах-термосах, но при условии ограниченного времени их транспортировки, которое определяется в соответствии с Правилами перевозок [1]. Поэтому актуальной является задача разработки системы термостабилизации грузового помещения при отсутствии автономной системы энергоснабжения по типу генераторно-приводной или дизель-генераторной установок.

В зависимости от рода груза он размещается в ГПВ тем способом укладки, который регламентируется Правилами перевозок [1]. Термосопригодные грузы, как правило, укладываются в грузовом помещении плотным штабелем из тары (ящиков, картонных коробок, полиэтиленовых упаковок и т.д.). При использовании тепловых аккумуляторов, для сохранения кондиций перевозимого груза и исключения его подмораживания в зимний период, ставится задача сохранения теплоты, аккумулированной грузом в процессе его производства и хранения на складе.

Тепловая мощность системы отопления вагона рассчитывается лишь для компенсации теплотопотерь через ограждающие конструкции изотермического кузова вагона. В случае ее использования в рефрижераторном вагоне предлагаемые технические решения системы обогрева позволяют отказаться от систем воздухораспределения, что позволяет без изменения габарита подвижного состава увеличить высоту загрузки, что особо актуально для перевозок СПП с малым удельным весом (фруктов и различных видов плодоовощной продукции).

Ранее в работе [2] были рассмотрены процессы обогрева грузового помещения отапливаемого изотермического вагона с помощью системы обогрева, которая подразумевает наличие стороннего источника энергии или автономного дизельного или подвагонного генератора. В процессе продолжения инициативных работ авторов появилось техническое решение, позволяющее отказаться от электроэнергии и использовать тепловые аккумуляторы с теплоаккумулирующими материалами [3, 4]. Сформируем исходные данные геометрические условия для решения тепловой задачи.

В вагоне с размерами полезного объема ГПВ ($l_1 \times l_2 \times l_3$) помещается штабель с грузом с размерами ($h_1 \times h_2 \times h_3$). Значения величин показаны в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры ГПВ и штабеля с грузом

Геометрическая характеристика	Грузовое помещение вагона	Штабель с грузом
Длина	16,4	16,3
Ширина	2,7	2,5
Высота у стен (без сегментной части)	2,4	2,37
Площадь торцевой поверхности, м ²	6,48	5,925
Площадь боковой поверхности, м ²	39,36	38,63
Площадь пола (потолка), м ²	44,2	42,6
Полная площадь поверхности теплообмена, м ²	180	174,26
Объем, м ³	106,27	96,58

Штабель считается сплошным твердым телом с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Для описания свойств таких грузов, как, например, фруктовый сок в стеклянной таре, использовался следующий подход. Штабель рассматривается как сплошное изотропное тело, включающее: жидкий фруктовый сок – 78,6 %, стеклянную тару – 19,6 %, и картон (упаковка) – 1,8 %. Эквивалентные характеристики (специальный индекс для этого понятия далее не вводим, а считаем его принятым по умолчанию) этого тела – плотность ρ , удельная теплоемкость C и коэффициент теплопроводности λ – рассчитывались как средние величины по названным процентным соотношениям. Результаты расчетов таковы: $\rho = 1176,6$ кг/м³; $\lambda = 0,558$ Вт/м град; $C = 3,44$ кДж/(кг·К).

Обычно груз в начальный момент времени имеет температуру $T_0 \approx +7^\circ \text{C}$, а температура среды внутри ОИВ поддерживается постоянном уровне $\tilde{T} = +2,5^\circ \text{C}$.

Охлаждение груза за время транспортирования на $\Delta T_{\text{охл}} = T_0 - \tilde{T} = 4,5^\circ \text{C}$ считается допустимым. Этот допустимый предел достигается действием двух факторов: отводе теплоты в окружающее пространство через все стенки ограждения ГПВ и притоку теплоты от нагревательной системы вагона.

Считаем, что стенки ограждения ГПВ включают теплоизолированные боковые стены кузова, «теплый пол» и крышу. Боковые стенки изготавливаются многослойными и включают стальной лист толщиной 2 мм, слой теплоизоляции из пенополистирола толщиной 200 мм и внутреннюю обшивку толщиной 2 мм, выполненную из сплава АМГ5.

«Теплый пол» тоже рассматривается как многослойная система, включающая:

1) слой тепловой изоляции толщиной 100 мм, изготовленный из жестких минераловатных плит на битумной связке по ГОСТ 10140-71 (плотность $\rho_{ти} = 250 - 300 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $\lambda_{ти} = 0,064 - 0,075 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; удельная теплоемкость $C_{ти} = 0,86 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$);

2) блок плоских тепловых аккумуляторов (ТА) толщиной 150 мм в коробе из аустенитной стали (плотность $\rho_{ст} = 7805 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $\lambda_{ст} = 40 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; удельная теплоемкость $C_{ст} = 0,445 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$). Каждый из ТА содержит теплоаккумулирующий материал (ТАМ) и электронагревательный гибкий элемент (ЭЛНГЭЛ), прикрытый сверху напольными решетками. Суммарная масса решеток и блока ТА в металлических коробах $\sim 4500 \text{ кг}$.

Средний по поверхности ограждения ГПВ коэффициент теплопередачи в окружающее пространство кузова $k_{гпв} = 0,3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}$;

3) штабель перевозимого груза (стеклянные банки с соком, упакованные в картонные коробки вместимостью по 4 банки каждая).

Циркуляция воздуха в ГПВ возникает за счет естественной конвекции, возникающей от «теплого пола», имеющего температуру $T_{пол} \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$, причем токи воздуха проходят через воздушный зазор между штабелем и вертикальной стенкой ограждения ГПВ толщиной 50 мм и напольные решетки высотой 100 мм.

Для обеспечения термообработки штабеля перевозимого груза ГПВ имеет гофры на внутренних и торцевых стенах, с их учетом внутренняя площадь теплопередающих поверхностей ГПВ составляет $229,6 \text{ м}^2$. Зазор между стенками ГПВ и штабеля продукта определяется шириной гофра и составляет $\delta = 0,05 \text{ м}$.

Снаружи ГПВ защищено слоем тепловой изоляции толщиной $\delta_{т.и.} = 220 \text{ мм}$, выполненной из пенополистирола, плотностью $\rho_{ти} = 45 \text{ кг/м}^3$, коэффициентами теплопроводности $\lambda_{ти} = 0,03 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ и удельной теплоемкостью $C_{ти} = 1,34 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$. Термическое сопротивление тепловой изоляции потоку теплоты из ГПВ составляет $\delta_{ти}/\lambda_{ти} = 7,33 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Все ТА – герметичные сосуды, заполненные ТАМ, собранные посекционно и скрепленные друг с другом. Для удобства эксплуатации и возможности ручной укладки на пол ГПВ масса каждой секции не должна превышать 10–15 кг.

Значительная величина эквивалентной теплоемкости ТАМ обеспечивается фазовыми переходами (плавление – затвердевание). Как правило, при нагревании происходит поглощение тепла, а при охлаждении тепло выделяется. Аккумулятор на основе теплоты фазового перехода при температуре фазового перехода $T_{ф}$ относится к системам с регенерацией тепла. Увеличение энтальпии системы «твердое тело – жидкость» при нагревании от температуры $T_1 < T_{ф}$ до температуры $T_2 > T_{ф}$ описывается уравнением:

$$\Delta h = C_{тв}(T_{ф} - T_1) + \Delta r_{ф} + C_{ж}(T_2 - T_{ф}),$$

где $C_{тв}$ и $C_{ж}$ – удельные теплоемкости твердой и жидкой фаз в ТАМ, Дж/кг·К;

$\Delta r_{ф}$ – удельная энтальпия фазового перехода, Дж /кг.

Эксергическая емкость аккумулятора определяется соотношением [3, 4]:

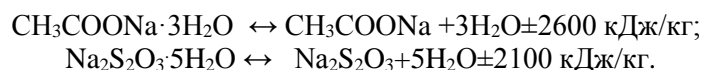
$$\frac{\Delta E}{m_{ТАМ}} = C_{тв} \left(T_{ф} - T_1 - T_g \ln \frac{T_{ф}}{T_1} \right) + \Delta r_{ф} \left(1 - \frac{T_g}{T_{ф}} \right) + C_{ж} \left(T_2 - T_{ф} - T_g \ln \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Температура фазового перехода ТАМ должна быть достаточно высокой, чтобы возбуждать токи воздуха от «теплого пола», проходящие через весь штабель груза в ГПВ, поэтому ТА необходимо предварительно разогревать с помощью электроподогрева. Аккумулятор должен иметь, возможно, большую удельную теплоту плавления ТАМ для обеспечения удобства в эксплуатации. Он предварительно заряжается в пункте погрузки от наземного источника электропитания, а во время движения вагона – от электрогенератора, входящего в комплект оборудования изотермического вагона. Запасенной в ТА теплоты должно хватать на все время простоя изотермического вагона (априори величина принята равной трем суткам) [7].

Некоторые из ТАМ, удовлетворяющие названным условиям, отмечены в табл. 2. В качестве ТАМ могут использоваться твердые парафины с плотностью $\rho_{ТАМ} = 790 \text{ кг/м}^3$ и удельной теплотой плавления $r_{пл} = 2,25 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, технические воски и стеарин, имеющие практически ту же теплоту

плавления, но более высокую (+80 °С) температуру плавления [5], и кристаллогидраты солей [6]. Последние имеют более широкие по температуре и теплоте плавления рабочие параметры, но проявляют большую, чем парафины коррозионную активность.

В качестве примеров фазообратимых реакций можно назвать реакции разложения кристаллогидратов уксуснокислого натрия трехводного и гипосульфита натрия пятиводного:



На основании этих солей разработана солевая смесь Локка, отмеченная в табл. 2. Как видно из этой таблицы, у неё очень большая теплота плавления и удобная для поставленной задачи поддержания температурного режима в ГПВ температура плавления, кроме того, эта смесь имеет низкую себестоимость и почти не проявляет коррозионной активности.

Таблица 2

Физические свойства ТАМ (парафина, гидратов солей) [7]

Вещество	Температура плавления, $T_{пл}$, °С	Теплота плавления, $r_{пл}$		Удельная теплоемкость, C кДж/кг·°С	Плотность, ρ кг/дм ³
		кДж/кг	кДж/дм ³		
Парафин орского НПЗ (C ₂₁ -C ₂₅)	59	225	178	1,08 (тв)	0,851
Ва(ОН)·8Н ₂ О	78,0	267	581	1,17(тв.)	2,180 (тврд.)
КAl(SO ₄) ₂ ·12Н ₂ О	92	254,4	445,2		1,75
СН ₃ СООНа·3Н ₂ О	59	2604	4427		1,7
Солевая смесь Локка: СН ₃ СООНа·3Н ₂ О+Na ₂ S ₂ O ₃ ·5Н ₂ О +глицерин+CaCl ₂	59	3120	5360		1,68

Выше отмечалось, что эквивалентная теплоемкость штабеля продукта в ГВП равна $C = 3,44$ кДж/(кг·К) и охлаждается он от начальной температуры $T_0 \approx +7^\circ\text{C}$ до $\tilde{T} \approx +2,5^\circ\text{C}$. При этом удельная теплота теплоотвода составляет $Q_{отвод} = C\Delta T_{охл} \approx 15$ кДж/кг. Однако запасенное в каждом килограмме ТАМ (солевой смеси Локка) количество теплоты фазового превращения $r_{пл} = 3120$ кДж/кг, т. е. в 208 раз превышает удельную теплоту, отводимую от каждого килограмма перевозимого груза.

Выводы

Использование тепловых аккумуляторов создает необходимый запас тепловой энергии, позволяющий сохранять температурный режим в грузовом помещении вагона, предназначенном для перевозки скоропортящихся термочувствительных пищевых продуктов. Положительные температуры в заданном узком температурном интервале, обеспечивающем сохранность и кондиционность груза, поддерживаются только за счет теплоты, аккумулированной перевозимым грузом и тепловыми аккумуляторами. При этом груз сохраняется в течение длительного времени как при движении вагона, так и при продолжительном простое вагона, что позволяет увеличить гарантированный срок доставки груза в вагоне-термосе и расширить номенклатуру перевозимых грузов.

Список литературы

1 Правила перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов : утв. приказом Минтранса России от 4 марта 2019 г. № 66. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_326540 (дата обращения: 09.08.2024).

References

1 Rules for the transportation of perishable goods by rail : approved by order of the Ministry of Transport of Russia dated March 4, 2019 No. 66. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_326540 (date of access: 08/09/2024).

- 2 **Ворон, О. А.** Тепловые процессы в штабеле скоропортящихся грузов, транспортируемых в отапливаемом изотермическом вагоне / О. А. Ворон, В. И. Моисеев // (Thermal processes in the stack of perishable cargo transported in the heated isothermal car) // Journal of Physics : Conference Series : Volume 2131 (2021). – DOI 10.1088/1742-6596/2131/2/022044.
- 3 **Бекман, Г.** Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гилли ; перевод с англ. В. Я. Сидорова, Е. В. Сидорова; под. ред. В. М. Бродянского. – Москва : Мир, 1987. – 271 с.
- 4 Теплоаккумулирующие материалы на основе кристаллогидратов / В. Д. Александров [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 1 (75). – 2009. – С. 100–106. – ISSN 2519-2817.
- 5 **Моисеев, В. И.** Динамика остывания парафинов в тепловых аккумуляторах транспортных цистерн / В. И. Моисеев, А. М. Воробьев // Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук (РА РАН). – 2005. – № 4 (45). – С. 36–40. – ISSN 2075-3608.
- 6 **Даффи, Дж.** Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. Даффи, У. А. Бекман. – Москва : Мир, 1977. – 420 с.
- 7 **Моисеев, В. И.** Транспортировка летних видов дизельных топлив вагонами-цистернами при отрицательных температурах / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов // Вестник транспорта Поволжья. – № 4 (76). – 2019. – С. 90–94. – ISSN 1997-0722.
- 8 **Ворон, О. А.** Методология исследования потребностей развития транспортной инфраструктуры и подвижного состава для перевозок скоропортящихся грузов / О. А. Ворон // Мир транспорта. – 2021. – Том 19 (3). – С. 6–15. – URL: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-3-1> (дата обращения: 01.09.2024).
- 9 **Старовойтов, С. В.** Теплоаккумуляторы / С. В. Старовойтов, Д. В. Союстов, Д. И. Босько // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 06–07 октября 2020 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2020. – С. 104–107. – ISBN 978-5-907295-24-7.
- 10 **Старовойтов, С. В.** Система увлажнения камер железнодорожного складского комплекса по хранению овощей и фруктов / С. В. Старовойтов, А. В. Муравьев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 97–103. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_97.
- 2 **Voron, O. A.** Thermal processes in the stack of perishable cargo transported in the heated isothermal car / O. A. Voron, V. I. Moiseev // Journal of Physics : Conference Series : Volume 2131 (2021). – DOI 10.1088/1742-6596/2131/2/022044.
- 3 **Beckmann, G.** Thermal energy storage / G. Beckmann, P. Gilly ; translated from the English by V. Ya. Sidorov, E. V. Sidorov; edited by V. M. Brodyansky. – Moscow : Mir, 1987. – 271 p.
- 4 Heat-storage materials based on crystal hydrates V. D. Aleksandrov [et al.] // Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. – 1 (75). – 2009. – P. 100–106. – ISSN 2519-2817.
- 5 **Moiseev, V. I.** Dynamics of paraffin cooling in heat accumulators of transport tanks / V. I. Moiseev, A. M. Vorobyov // Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences (RAS). – 2005. – 4 (45). – P. 36–40. – ISSN 2075-3608.
- 6 **Duffy, J.** Thermal processes using solar energy / J. Duffy, W. A. Beckman. – Moscow : Mir, 1977. – 420 p.
- 7 **Moiseev, V. I.** Transportation of summer types of diesel fuels by tank cars at negative temperatures / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov // Bulletin of Transport of the Volga Region. – No. 4 (76). – 2019. – P. 90–94. – ISSN 1997-0722.
- 8 **Voron, O. A.** Methodology for studying the needs for the development of transport infrastructure and rolling stock for the transportation of perishable goods / O. A. Voron // World of Transport. – 2021. – Vol. 19 (3). – P. 6–15. – URL: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-3-1> (date of access: 09/01/2024).
- 9 **Starovoytov, S. V.** Heat accumulators / S. V. Starovoytov, D. V. Soyustov, D. I. Bosko // Transport energy. Actual problems and tasks : collection of scientific papers of the IV International scientific and practical conference. Rostov-on-Don, October 06–07, 2020. – Rostov-on-Don : RSTU, 2020. – P. 104–107. – ISBN 978-5-907295-24-7.
- 10 **Starovoytov, S. V.** Humidification system for chambers of a railway warehouse complex for storing vegetables and fruits / S. V. Starovoytov, A. V. Muravyov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 97–103. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_97.

O. A. Voron, V. I. Moiseev

APPLICATION OF HEAT ACCUMULATORS IN TRANSPORTATION OF PERISHABLE GOODS IN AN ISOTHERMAL CAR

Abstract. The article considers the method and technical devices for long-term maintenance of the temperature regime in a heated isothermal car intended for transportation of perishable food products. The article is a continuation of the authors' initiative research on the development of technical solutions for the type of isothermal cars and high-capacity containers. The proposed devices are considered together with the use of electric heating elements and a block of heat accumulators with a large equivalent heat capacity, provided by phase-reversible reactions in the heat-accumulating material. The article presents analytical dependencies for calculating the phase transition parameters of some heat-accumulating materials, allowing to calculate the dimensions and select the type of heat accumulator best suited for use in the transportation of "thermally suitable" goods in a thermos car.

Keywords: perishable food products, isothermal car, heat accumulator, heat-accumulating material, "heated floor" heating system, cargo space.

For citation: Voron, O. A. Application of heat accumulators in transportation of perishable goods in an isothermal car / O. A. Voron, V. I. Moiseev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 103–108. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_3_103.

Сведения об авторах

Ворон Олег Андреевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: rgups_voron@mail.ru

Моисеев Владимир Иванович

Петербургский государственный
университет путей сообщения императора
Александра I (ПГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: moiseev_v_i@list.ru

Information about the authors

Voron Oleg Andreyevich

Rostov State Transport University (RGUPS),
Chair «Wagons and Car Facilities»,
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: rgups_voron@mail.ru

Moiseev Vladimir Ivanovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University,
Chair «Higher Mathematics»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: moiseev_v_i@list.ru

И. Ш. Элязов, Э. Н. Юсифзаде, А. Б. Бахшиев, И. Д. Гусейнов

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ВАГОНА

Аннотация. Колесная пара является основной частью вагона, ее прочность и долговечность рассчитываются традиционными методами. Однако вопросы обеспечения долговечности колесной пары в течение заданного срока службы в теории вагонов мало изучены. Для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации колесных пар вагонов на сети железных дорог к ним предъявляются различные требования, которые необходимо в первую очередь подтвердить путем оценки показателей прочности и выносливости.

Предложена методика расчета вероятности долговечности колесной пары до достижения ею предельного состояния. Долговечность колесной пары по коэффициенту усталостной выносливости определена исходя из квантиля в зависимости от изменения разности напряжений. Отчет выполнен с учетом основных параметров механических свойств колесной пары (прочность, геометрические размеры пары колеса, качество поверхности). Предложенный метод расчета долговечности колесной пары может быть применен как прогрессивный метод при обеспечении показателей надежности деталей и узлов вагонов, а также других машин и механизмов, что позволит увеличить долговечность колесной пары, а также снизить объем затрат на техническое обслуживание и ремонт вагонов.

Ключевые слова: вагон, колесная пара, долговечность, коэффициент запаса, коэффициент долговечности, прочность, ресурс, надежность, напряжение.

Для цитирования: Методика расчета долговечности колесной пары вагона / И. Ш. Элязов, Э. Н. Юсифзаде, А. Б. Бахшиев, И. Д. Гусейнов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 109–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_109.

Введение

Многие исследователи [1–3] в области проектирования нетяговых транспортных средств, расчета ресурса и прочности колесных пар вагонов на первое место ставят следующие основные задачи: определение статических и динамических сил, действующих на колесные пары, определение возникающих напряжений, определение показателей прочности и долговечности элементов колесной пары вагона.

В работе [4] авторы описывают расчетные и экспериментальные методы, используемые для подтверждения прочности и оценки ресурса (долговечности) элементов колесных пар вагонов на основе метода вероятностной аппроксимации.

В статье [5] авторы предлагают более совершенный метод измерения силы взаимодействия колесной пары с рельсом, а также оценки безопасности железнодорожного транспорта. Этот метод включает в себя запись уравнений балансировки колесной пары и расчет сил между колесом и рельсом на основе измеренных сил подвески и инерции.

Анализ выполненных научных работ [1, 4, 6–8] показывает, что для расчета колесной пары грузового вагона существует несколько стандартных и математических методик:

- 1) расчет из условия обеспечения сцепления колеса с рельсом и силы тяги;
- 2) расчет из условия прочности элементов колесной пары;
- 3) расчет по критериям устойчивости и безопасности движения;
- 4) эмпирический расчет на основе статистических данных.

Расчет сопротивления усталости колесной пары в условиях нестационарного нагружения следует проводить в соответствии с требованиями [9], и для этого расчета автор [10] принял коэффициент запаса *усталостной прочности*. Согласно требованиям [9] необходимо рассчитать ось на усталостную прочность в условиях нестабильного нагружения. Автор [10] показывает, что *коэффициент запаса усталостной прочности* определяется отношением предела выносливости оси при круговом изгибе (симметричном цикле) к эквивалентному напряжению, представляющему собой амплитуду условного (расчетного) стационарного режима нагружения. Коэффициент усталостной прочности сравнивается с

допустимым значением, определенным на основании опыта эксплуатации. При этом рекомендуемые значения следующие: для грузовых вагонов $[n] = 1,9-2,0$.

На железных дорогах (колеи 1520 мм) стран СНГ производится прочностной (долговечный) расчет осей на основе специальной методики, разработанной Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ») и Научно-исследовательским институтом вагоностроения (ОАО «НИИВ»). Этот метод часто называют методом условных расчетов. В США также используют метод Рело, отличающийся от этого метода величиной горизонтальной нагрузки. Немецкие специалисты разработали условную методику расчета осей, принятого государствами Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД). В этом методе осевые напряжения сравниваются с пределами выносливости материала колесной пары и определяются коэффициенты запаса прочности для заданных сечений.

Условный расчет колесной пары на прочность в теории вагонов также выполняется на основе методов, принятых в ОСЖД. При использовании этих методов расчет оси производится в зависимости от максимального износа, связанного с износом шейки оси и перегрузкой вагона. Традиционный метод используется для выявления причин поломки или деформации оси как в процессе эксплуатации, так и независимо от нагрева буксы. В настоящее время для расчета прочности и износостойкости колесных пар вагонов на железных дорогах стран СНГ (колеи 1520 мм) применяется методика отчетности АО «ВНИИЖТ» и ОАО «НИИВ», разработанная совместно с Научно-исследовательским институтом вагоностроения и АО «ВНИИЖТ». В этом методе отчетности ось рассматривалась в статическом состоянии, а силы, действующие на нее в динамическом состоянии, учитывались с использованием коэффициентов $k_1 = 1,25$ и $k_2 = 0,5$.

В статье [6] предлагается метод определения назначенного срока службы чистовой оси колесной пары грузового вагона по ГОСТ 33200–2014 [11]. Приводится пример расчета для оси РУ1Ш–ОС–2. Предложенный метод расчета может быть взят за основу при назначении срока службы чистовой оси колесной пары по Техническому регламенту [12]. В соответствии с пунктом 3В раздела технического регламента ТР ТС 001/2011 безопасность железнодорожного подвижного состава и его составных частей должна обеспечиваться в том числе и путем установления назначенных сроков службы колесной пары. Автор показал, что до настоящего момента оси колесных пар не имеют такого параметра, поэтому расчет колесной пары на долговечность является актуальной задачей [6, с. 22–25].

В результате исследований и испытаний колесных пар, проведенных на промышленных предприятиях Германии [13], установлено, что существует взаимодействие между сроком службы и напряжениями (значениями диаметра). Показано, что важные выводы для практического расчета основных элементов подвижной части можно сделать только с учетом реальных эксплуатационных нагрузок и реальных данных прочности. Такие расчеты выполнены исследователем в несколько этапов:

- конструкторские разработки и расчеты на основе принятых реальных нагрузок и правильно выбранных прочностных параметров;
- оценка прочности в испытательных пробегах;
- проверка значений нагрузки по результатам исследований геометрии профиля дороги;
- предварительная доработка конструкции, а также технических требований.

В статье [14] предложен подход, позволяющий обеспечить соблюдение требований Технического регламента [12] без отклонения от документации по техническому обслуживанию и эксплуатации. Как и в случае детали, спроектированной по модели неограниченного ресурса, был обоснован расчетный срок службы оси колесной пары, был предложен расчетный срок службы готовой оси колесной пары около 40 лет.

В статье [6] предложен модифицированный подход к определению нормативного ресурса осей колесных пар при воздействии циклических и ударных нагрузок, вызванных поверхностными дефектами профиля катания колес. Например, определяется сопротивление усталости оси РУ1Ш–ОС–2 по ГОСТ 33200–2014. Показано, что наименьший срок службы имеется в зоне перехода от шейки оси к ступице колеса. По результатам расчета получены конкретные параметры напряжений и модифицированных коэффициентов запаса для различных сечений оси. Срок службы для всех сечений оси РУ1Ш с учетом действия ударных циклических нагрузок в зависимости от дефектов поверхности катания колеса позволяет установить назначенный эксплуатационный срок службы оси не более 45 лет. В статье [15] предложена методика для определения назначенного срока службы чистовых осей колесных пар грузового вагона по ГОСТ 33200–2014 [11] как продукции, спроектированной по модели с ограниченным запасом. В этой работе в качестве примера выполнен расчет для оси РУ1Ш.

В теории надежности в основном используются расчетно-экспериментальные методы проверки долговечности элементов конструкций. Расчетный метод не определяет вероятность достижения предельного состояния колесной пары при заданном ресурсе. Она основана на среднем сроке службы колесной пары ($T_{or} = 15$ лет) и является ключевыми показателем ее долговечности.

Для обеспечения безопасной эксплуатации колесной пары вагона на сети железных дорог к ней предъявляются новые требования, которые должны подтверждаться путем оценки параметров долговечности и прочности [12]. Многие исследования показали, что безопасность движения поездов во многом зависит от показателей надежности вагонов, а также их узлов и деталей. Долговечность является основным показателем надежности колесной пары и свойством сохранять ее исправность в процессе эксплуатации до достижения показателей предельных состояний, определенных системой технического обслуживания и ремонта вагонов [8, 16, 17].

Основная часть

Таким образом, после изучения результатов исследования надежности было установлено, что расчеты долговечности колесной пары с помощью новых методов являются актуальными и необходимы исследования для разработки улучшения стандартного метода отчетности. В этом разделе мы обсудим усовершенствованный метод проверки долговечности колесной пары с использованием современных методов расчета долговечности осей. В данном исследовании следует определить долговечность компонентов движущихся частей вагона, в том числе колесной пары, и рассчитать ее вероятностное значение P_i . Основные данные относительно необходимости долговечности колесной пары вагона представлены в табл. 1. Проверка надежности колесной пары проводится с использованием коэффициента усталости. Создается отчет, включающий состояние колесной пары и выявляющий опасные сечения (рисунок).

Таблица 1

Основные данные о требованиях к долговечности колесной пары

Ранг стоимости ремонта	Вероятность достижения предельного состояния	Коэффициент использования времени	Степень изменения составной части	Коэффициент вариации ресурса	Коэффициент перехода	Гамма-процент ресурса, ч	Средняя наработка колесной пары	Средний ресурс, ч	Закон распределения вероятностей
R_i	P_i	K_i	N_i	V	K_{yi}	T_{yi}	T_{oi}	$T_{or.i}$	Нормальный
0,75	0,82	1,0	1,0	0,40	0,75	8100	11000	11000	

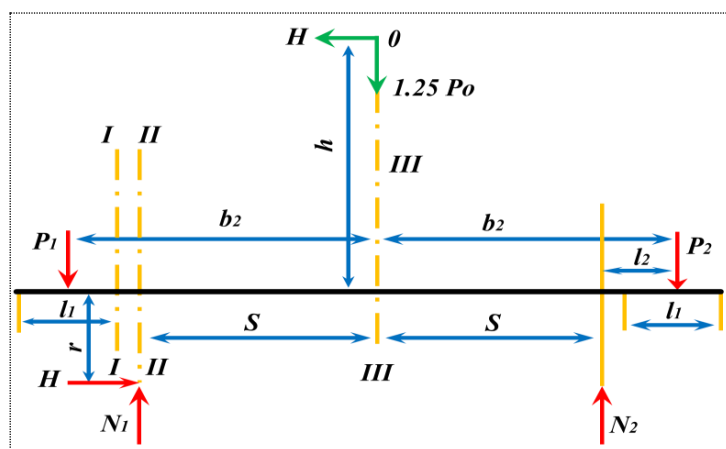


Схема расчета колесной пары вагона

В схеме отчетности колесной пары учтены все факторы, которые могут повлиять на их долговечность. Сюда входят напряженное состояние, физико-механические или усталостные характери-

стики материала, изменение предела допуска от концентрации напряжений, линейные размеры колесной пары, качество обработанных поверхностей, упрочнение рабочих поверхностей. В табл. 2. приведены данные по всем этим факторам.

Таблица 2

Предварительные данные отчета о долговечности

№	Названия параметров	Знак	Значение
1	Марка материала оси	Марка I	ГОСТ10791–2011
1.1.	Твердость	HB	190–230
1.2.	Предел прочности	σ_b	580–630 МПа
1.3	Предел выносливости при изгибе	σ_{-1}	210–230 МПа
2	Первый шаг (сечения I-I)		
2.1.	Изгибающий момент, кН · м	M_1	26,042 [10]
2.2.	Частота вращения, мин ⁻¹	N_1	3114
3	Второй шаг (сечения II-II)		
3.1.	Изгибающий момент, кН · м	M_2	94,95 [10]
3.2.	Частота вращения	N_2	2166
4	Третий шаг (сечения III-III)		
4.1	Изгибающий момент, кН · м	M_3	53,81 [10]
4.2	Частота вращения	N_3	2564
5	Средний ресурс	$T_{ор}$	11000 ч
6	Вероятность, соответствующая среднему ресурсу	$K_{ок}$	85 %

Проверка требования к долговечности колесной пары осуществляется путем принятия соответствующего закона распределения надежности через переход от среднепроцентного ресурса к гамма-процентному ресурсу [16]. Для определения долговечности учитывается вероятностное распределение механических свойств материалов, которое включает в себя функцию распределения, механическое ожидание, коэффициент вариации, дисперсию, медиану и квантиль заданного уровня [17]. Установлено, что в связи с разрушением конструкции и режимом загрузки долговечность соответствует нормальному закону распределения [8, 18].

С учетом выполненных исследований по расчету прочности и долговечности колесной пары, выбор новых методов расчета долговечности становится все более актуальным. Поскольку колесная пара вагона работает в тяжелых условиях, ее расчет в большей степени обусловлен напряженными условиями, возникающими в сечениях оси, и долговечность следует рассматривать как оптимальный параметр. Известно, что долговечность является основным решающим фактором в теории надежности машин и деталей [16], поэтому научной новизной данной статьи является методика расчета устойчивости колесной пары вагона на основе показателя, зависящего от предела устойчивости колесной пары и дисперсии предела устойчивости. Вероятность расчета долговечности на основе коэффициента усталостной выносливости колесной пары определяется с помощью квантиля U_a в зависимости от изменения разности напряжений:

$$U_a = \frac{\sigma_{-1n} - \sigma_{ek}}{\sqrt{D_{1n} - D_{ek}}}, \quad (1)$$

где σ_{-1n} – предел выносливости колесной пары при изгибе, МПа,

$$\sigma_{-1n} = \sigma_{-1} \cdot K_v \cdot K_N / K_{on}, \quad (2)$$

где $\sigma_{-1} = 210\text{--}230$ МПа – предел выносливости материала оси при изгибе;

K_v – коэффициент, учитывающий упрочнение поверхности, $K_{v1} = K_{v2} = K_{v3} = 1,8$ – принимается при обкатке роликом;

K_{on} – уменьшающий коэффициент выносливости от изменения концентрации напряжений галтели, рассчитывается по формуле

$$K_{on} = \frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1, \quad (3)$$

где $K_{\sigma 2} = 2,95$ [18], поскольку колесо расположено по сечению II-II колесной пары;

K_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений при изгибе, этот коэффициент зависит от радиуса галтели: $r = 20$ мм, $K_{\sigma 1} = 1,37$ – сечение I-I и $r = 20$ мм, $K_{\sigma 3} = 1,0$ – сечение III-III;

$K_{d\sigma}$ – коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения оси при изгибе, рассчитывается по следующей эмпирической формуле:

$$K_{d\sigma} = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{7,5}{d_i} \right]^{2\nu_{\sigma}}, \quad (4)$$

Здесь d_i – диаметры поперечного сечения оси в зонах контакта: $d_1 = 135$ мм, $d_2 = 194$ мм, $d_3 = 165$ мм; ν_{σ} – параметр уравнения подобия усталостного разрушения,

$$\nu_{\sigma} = 0,14 - 0,000125\sigma_b, \quad (4a)$$

который зависит от прочности материала оси на растяжение;

$K_{F\sigma}$ – коэффициент, учитывающий качество рабочих поверхностей оси ($R_z = 10$, $R_z = 6,3$ и $R_z = 6,3$ мкм) и зависящий от шероховатости поверхности,

$$K_{F\sigma} = 1 - 0,122 \cdot \left[\lg \left(\frac{\sigma_b}{20} \right) - 1 \right] \cdot \lg R_z; \quad (5)$$

K_N – коэффициент долговечности, находится из условия неравенства, учитывающего рабочие циклы колесной пары:

$$K_N = \sqrt{\frac{N_{FO}}{N_{FE}}} > 1, \quad (6)$$

где число базовых циклов изменения напряжения колесной пары грузового вагона $N_{FO} = 5 \cdot 10^8$ [19];

N_{FE} – эквивалентное число рабочих циклов, равно сумме числа циклов изменения напряжения под действием постоянных нагрузок, рассчитывается в зависимости от частоты вращения колесной пары, $V = 22$ м/с (80 км/ч) для Азербайджанской железной дороги, $D = 950$ мм, $n = 650$ мин⁻¹:

$$N_{FE} = 60 \cdot n \cdot T_{ок}. \quad (7)$$

m – индекс наклона левой ветви кривой усталости, рассчитываемый по следующему уравнению:

$$m = \left(5 + \frac{\sigma_b}{80} \right) \cdot \left(\frac{K_v}{K_{он}} \right), \quad (8)$$

Значение эквивалентного напряжения, включенного в формулу квантильного отчета (1), зависит от нормального напряжения:

$$\sigma_{ek} = \sigma \cdot \sqrt{n_{\sigma}^2 - 1}, \quad (9)$$

где σ – нормальные напряжения, возникающие в опасных сечениях оси, МПа;

n_{σ} – запас прочности на изгиб, находится из условия

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{1n}}{\sigma}. \quad (9a)$$

Дисперсия предела допуска, входящая в формулу (1), равна $D_{\sigma-1n}$, а дисперсия эквивалентного напряжения D_{ek} рассчитывается следующим образом:

$$D_{\sigma-1n} = \sigma_{-1n}^2 \cdot V_{\sigma-1n}^2, \quad D_{ek} = \sigma_{ek}^2 \cdot V_{\sigma ek}^2. \quad (10)$$

Здесь $V_{\sigma ek}$ – коэффициент вариации эквивалентного напряжения, выбранный из таблицы [17]; $V_{\sigma-1n}^2$ – коэффициент вариации предела выносливости колесной пары, рассчитываемый по формуле

$$V_{\sigma-1n}^2 = V_{\sigma-1}^2 + V_k^2 + V_{kv}^2 + V_{\sigma-1} \cdot V_k + V_{kv} \cdot V_k, \quad (11)$$

где $V_{\sigma-1} = 0,09-0,11$ – коэффициент вариации предела выносливости материала колесной пары, который зависит от качества материала;

V_{kv} – коэффициент вариации величины K_v , $V_{kv} = 0,12$ принимается в случае упрочнения поверхности обкаткой роликом.

Расчет долговечности колесной пары целесообразно выполнять по таблице исходных данных (см. табл. 1), схеме отчета колесной пары (см. рисунок), а также таблице вероятности обеспечения заданного ресурса по показателю плотности (см. табл. 2). Расчетная вероятность $K_{ок}^h$ колесной пары по критерию усталостной выносливости определяется в зависимости от величины квантиля U_a .

Последовательность расчета долговечности колесной пары приведена в табл. 3.

Таблица 3

Последовательность расчета долговечности колесной пары

№ п/п	Названия параметров	Знак	Формула отчетности	Значение параметров		
				I-I	II-II	III-III
1	Расчетный диаметр, мм	d		135	194	165
2	Напряженная ситуация на осевых ступенях			Галтель $R = 20$ мм	Посадка с натягом	Галтель $R = 200$ мм
3	Момент сопротивления, см ³	W_u	$\pi d^3/32$	241	716	440
4	Изгибающий момент, Н·м	M_i		26,04	94,95	53,82
5	Расчет номинального напряжения	σ	M_i/W_u	108	132	122
6	Эффективный коэффициент концентрации напряжений	K_σ	[20]	1,82	1,52	1,23
7	Параметр уравнения подобия усталостного разрушения	V_σ	(4а)	0,179	0,173	0,176
8	Коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения оси при изгибе	$K_{d\sigma}$	(4)	0,668	0,662	0,672
9	Коэффициент влияния шероховатости поверхности	$K_{F\sigma}$	(5)	0,743	0,736	0,673
10	Уменьшающий коэффициент выносливости от изменения концентрации напряжений $-\sigma_{-1}$	K_{On}	(3)	2,26	2,70	2,31
11	Коэффициент, учитывающий упрочнение поверхности	K_v	[20]	1,8	1,8	1,8
12	Показатель наклона ветви кривой усталости	m	(8)	6,47	7,48	8,65
13	Эквивалентное количество рабочих циклов $N_{FE} \cdot 10^9$	N_{FE}	(7)	3,8	3,8	3,8
14	Число базовых циклов $N_{FO} \cdot 10^9$	N_{FO}	[18]	0,5	0,5	0,5
15	Коэффициент долговечности	K_N	(6)	1,04	1,037	1,032
16	Предел выносливости колесной пары при изгибе, МПа	σ_{-1n}	(2)	165	176	170
17	Запас прочности на изгибе	n_σ	(9а)	1,53	1,34	1,38
18	Эквивалентное напряжение	σ_{ek}	(9)	126	115	117
19	Коэффициент вариации величины K_v	V_k	[20]	0,12	0,12	0,12
20	Коэффициент вариации предела выносливости материала	$V_{\sigma-1}$	[20]	0,1	0,1	0,1
21	Квадрат коэффициента вариации предела долговечности материала	$V_{\sigma-1n}^2$	(11)	0,0652	0,736	0,0652
22	Коэффициент вариации порога	$V_{k\sigma}$	[20]	0,02	0,04	0,02
23	Дисперсия предела выносливости	$D_{\sigma-1n}$	(10)	1775,1	1660,3	1884,3
24	Коэффициент вариации эквивалентного напряжения	$V_{\sigma ek}$	[17]	0,2	0,2	0,2
25	Дисперсия эквивалентного напряжения	D_{ek}	(10)	635	529	547
26	Квантиль распределения разности напряжений	U_a	(1)	1,15	1,82	1,45
27	Вероятность обеспечения ресурса $T_{op}, \%$	K_{ok}	[18]	87,6	96,6	92,6

На основании расчетных значений квантиля по нормальному закону распределения [16] выбираем расчетную вероятность $K_{ок}^h$ колесной пары по критерию усталостной выносливости из соответствующих таблиц [18, 20]. Значения квантилей нормального распределения показано в табл. 4.

Таблица 4

Значения квантилей нормального распределения

U_a	$K_{ок}^h, \%$	U_a	$K_{ок}^h, \%$	U_a	$K_{ок}^h, \%$	U_a	$K_{ок}^h, \%$	U_a	$K_{ок}^h, \%$
0,0	50	0,6	73	1,2	88	1,8	96,4	2,4	99,2
0,1	54	0,7	76	1,3	90	1,9	97,1	2,5	99,4
0,2	58	0,8	79	1,4	92	2,0	97,7	2,6	99,5
0,3	62	0,9	82	1,5	93,3	2,1	98,2	2,7	99,6
0,4	66	1,0	84	1,6	94,5	2,2	98,6	2,8	99,7
0,5	69	1,1	86	1,7	95,5	2,3	98,9	2,9	99,8

Таким образом, для всех расчетных сечений колесной пары обеспечивается заданное значение долговечности $K_{ок}^h > K_{ок}$. Расчетная вероятность колесной пары по критерию усталостной выносливости определяется по данным табл. 4 в зависимости от величины квантиля U_a распределенной разности напряжений.

Выводы

В данной статье предложена методика расчета вероятности долговечности колесной пары в течение заданного срока службы. Долговечность колесной пары по коэффициенту усталостной выносливости рассчитана исходя из квантиля в зависимости от изменения разности напряжений. Отчет выполнен с учетом основных параметров механических свойств колесной пары (прочность, геометрические размеры пары колеса, качество поверхности). Путем определения квантиля распределения разности напряжений на опасных сечениях колесной пары получена вероятность обеспечения ресурса колесной пары в пределах 87–95 %. Предложенный метод расчета долговечности колесной пары может быть применен как прогрессивный метод при обеспечении показателей надежности деталей и узлов вагонов, а также других машин и механизмов. Таким образом, увеличивается долговечность колесной пары, а также снижается объем затрат на техническое обслуживание и ремонт вагонов.

Список литературы

- 1 Конструирование и расчет вагонов / В. В. Лукин, П. С. Анисимов, В. Н. Котуранов [и др.] ; под редакцией П. С. Анисимова. – 2-е изд. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2011. – 251 с. – ISBN 978-5-9994-0060-4.
- 2 Элязов, И. Ш. Методика расчета долго-вечности букс грузового вагона / И. Ш. Элязов, Л. М. Гасратова // Сборник научных трудов УГАЖДТ. Вып. 123. – Харьков, 2011. – С. 164–145.
- 3 Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений / под редакцией В. Н. Котуранова. – Москва : Маршрут, 2004. – 490 с. – ISBN 5-89035-256-3.
- 4 Оценка прочности и ресурса для установления назначенного срока службы колесной пары скоростного вагона-платформы / М. А. Волохов, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов [и др.] // Надежность : Структурная надежность. Теория и практика. – 2021. – № 4. – С. 46–52. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-4-26-30.
- 5 Jing, Zeng. Safety evaluation for railway vehicles using an improved indirect measurement method of wheel–rail forces / Zeng Jing, Lai Wei, Pingbo Wu

References

- 1 Design and calculation of wagons / V. V. Lukin, P. S. Anisimov, V. N. Koturanov [et al.] ; edited by P. S. Anisimov. – 2nd ed. – Moscow : UMC ZDT, 2011. – 251 p. – ISBN 978-5-9994-0060-4.
- 2 Elyazov, I. Sh. Methodology for calculating the durability of freight car axle boxes / I. Sh. Elyazov, L. M. Gasratova // Collection of scientific papers UGAZDT. Issue 123. – Kharkov, 2011. – P. 164–145.
- 3 Carriages. Fundamentals of design and examination of technical solution / edited by V. N. Koturanova. – Moscow : Marshrut. – 2004. – 490 p. – ISBN 5-89035-256-3.
- 4 Assessment of strength and resource for establishing the designated service life of a wheel pair of a high-speed flat car / M. A. Volohov, E. S. Oganyan, G. I. Gadzhimetov [et al.] // Reliability : Structural reliability. Theory and practice. – 2021. – No. 4. – P. 46–52. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-4-26-30.
- 5 Jing, Zeng. Safety evaluation for railway vehicles using an improved indirect measurement method of wheel–rail forces / Zeng Jing, Lai Wei,

// J. Mod. Transport. – 2016. – No. 24 (2). – P. 114–123. – DOI 10.1007/s40534-016-0107-5.

6 **Орлова, А. М.** Расчетное обоснование назначенного срока службы чистовой оси колесной пары грузового вагона / А. М. Орлова, В. С. Бабанин, И. В. Турутин // Конструкторские разработки. – 2023. – № 1 (61). – С. 22–26. – ISSN 1998-9318.

7 **Elyazov, İ. Ş.** Vaqonun itibarlıq göstəricisinin struktur skeminin yardımıyla hesablanması / İ. Ş. Elyazov // UMTİK-98 Bildiri kitabı, 9–11 Eylül 1998, Ankara, Türkiye. – Ankara, 1998. – S. 219–223. = **Элязов, И. Ш.** Расчет показателя надежности вагона с помощью структурной схемы / И. Ш. Элязов // Материалы конференции UMTİK, 9–11 сентября 1998 г., Анкара, Турция. – Анкара, 1998. – С. 219–223.

8 **Синапольников, В. А.** Надежность и диагностика технологических систем / В. А. Синапольников, С. Н. Григорьев. – Москва : Высшая школа, 2005. – 343 с. – ISBN 5-06-004422-X.

9 Нормы расчета и проектирования грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации / ФГУП-ВНИИЖТ-ФГУП ГосНИИВ. – Москва, 2004. – 213 с.

10 **Булавин, Ю. П.** Конструирование и расчет вагонов : учебно-методическое пособие / Ю. П. Булавин, Ю. Я. Бутенко ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2017. – 99 с.

11 **ГОСТ 33200–2014.** Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 47 с.

12 **ТР ТС 001/2011, № 710.** Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава». – Москва, 2011. – 66 с.

13 По материалам Фраунхоферовского института в Дармштадте. Федеральная служба исследований и испытаний материалов // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2011. – № 1/2. – С. 18–25 // Железные дороги мира. – 2011. – № 10. – С. 41–46. – ISSN 0013-2845.

14 **Орлова, А. М.** Физический смысл и способы установления назначенного срока службы и предельных состояний для составных частей грузовых вагонов / А. М. Орлова, Е. Ю. Семенов, С. С. Гаврилов // Техника железных дорог. – 2020. – № 3 (51). – С. 48–55. – ISSN 1998-9318.

15 VPI-EMG 04 Maintenance of Wagons. Wheelsets. Edition 4.01. 10.09.2020.

16 **Решетов, Д. Н.** Надежность машин / Д. Н. Решетов. – Москва : Высшая школа, 1988. – 238 с.

Pingbo Wu // J. Mod. Transport. – 2016. – No. 24 (2). – P.114–123.-DOI 10.1007/s40534-016-0107-5.

6 **Orlova, A. M.** Calculation justification of the assigned service life of the finished axle of the wheelset of a freight car / A. M. Orlova, V. S. Babanin, I. V. Turutin // Design developments. – 2023. – No. 1 (61). – P. 22–26. – ISSN 1998-9318.

7 **Elyazov, İ. Ş.** Vaqonun itibarlıq göstəricisinin struktur skeminin yardımıyla hesablanması / İ. Ş. Elyazov // UMTİK-98 Bildiri kitabı, 9–11 Eylül 1998, Ankara, Türkiye. – Ankara, 1998. – S. 219–223. = **Elyazov, I. Sh.** «Calculation of the reliability indicator of a car using a structural diagram», report at the UMTİK-98 conference, [tr], September 9–11, 1998, Ankara – Turkey. – P. 219–223.

8 **Sinapolnikov, V. A.** Reliability and diagnostics of technological systems / V. A. Sinapolnikov, S. N. Grigoriev. – Moscow : Higher School, 2005. – 343 p. – ISBN 5-06-004422-X.

9 Standards for the calculation and design of freight cars for 1520 mm gauge railways of the Russian Federation / FSUE-VNIIZhT-FSUE GosNIIV. – Moscow, 2004. – 213 p.

10 **Bulavin, Yu. P.** Design and calculation of cars : educational and methodical manual / Yu. P. Bulavin, Yu. Ya. Butenko ; FGBOU VO RGUPS. – Rostov-on-Don, 2017. – 99 p.

11 **GOST 33200–2014.** Axles of wheelsets of railway rolling stock. General specifications. – Moscow : Standartinform, 2015. – 47 p.

12 **TR CU 001/2011, No. 710.** Technical Regulations of the Customs Union “On the Safety of Railway Rolling Stock”. – Moscow, 2011. – 66 p.

13 Based on materials from the Fraunhofer Institute in Darmstadt. Federal Service for Materials Research and Testing // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2011. – No. 1/2, P. 18–25. // Railways of the World. – 2011. – No. 10. – P. 41–46. – ISSN 0013-2845.

14 **Orlova, A. M.** Physical meaning and methods for establishing the designated service life and limit states for the components of freight cars. / A. M. Orlova, E. Yu. Semenov, S. S. Gavrilov // Railway Engineering. – 2020. – No. 3 (51). – P. 48–55. – ISSN 1998-9318.

15 VPI-EMG 04 Maintenance of Wagons. Wheelsets. Edition 4.01. 10.09.2020.

16 **Reshetov, D. N.** Machine reliability / D. N. Reshetov. – Moscow : Higher School, 1988. – 238 p.

17 **Хазов, Б. Ф.** Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б. Ф. Хазов, Б. А. Дидусев. – Москва, 1986. – 224 с.

18 **Устич, П. А.** Надежность рельсового нетягового подвижного состава / П. А. Устич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников. – Москва : ИГ «Вариант», 1999. – 416 с.

19 **Elyazov, İ. Ş.** Vaqonların konstruksiyası : dərslük / İ.Ş. Eyazov. – Bakı : Təhsil NPM, 2011. – 364 s. = **Элязов, И. Ш.** Конструкция вагонов : учебник / И. Ш. Элязов. – Баку : Издательство «НПМ Техсил», 2011. – 364 с.

20 Надежность машиностроительной продукции : практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. – Москва : Издательство стандартов, 1990. – 328 с.

17 **Khazov, B. F.** Handbook for calculating the reliability of machines at the design stage / B. F. Khazov, B. A. Didusev. – Moscow, 1986. – 224 p.

18 **Ustich, P. A.** Reliability of rail non-traction rolling stock / P. A. Ustich, V. A. Karpychev, M. N. Ovechnikov. – Moscow : IG «Variant», 1999. – 416 p.

19 **Elyazov, İ. Ş.** Vaqonların konstruksiyası : dərslük / İ.Ş. Eyazov. – Bakı : Təhsil NPM, 2011. – 364 s. = **Elyazov, I. Sh.** Design of cars : [az] / textbook / I. Sh. Elyazov. – Baku : Publishing House «NPM Tekhsil» 2011. – 364 p.

20 Reliability of engineering products : a practical guide to standardization, confirmation and provision. – Moscow : Publishing house of standards, 1990. – 328 p.

I. Sh. Elyazov, E. N. Yusifzade, A. B. Bakhshiev, I. D. Huseynov

METHOD FOR CALCULATING THE DURABILITY OF A CAR WHEELSET

Abstract. The wheelset is the main part of the car, its strength and durability are calculated using traditional methods. However, the issues of ensuring the durability of a wheelset during a given service life have been little studied in the theory of cars. In order to ensure the safe and efficient operation of wheel pairs of cars on the railway network, various requirements are imposed on them, which must first be confirmed by assessing strength and endurance indicators.

A method for calculating the probability of durability of a wheelset before reaching its limit state is proposed. The durability of the wheelset according to the fatigue endurance coefficient is determined based on the quantile, depending on the change in the stress difference. The study is made taking into account the main parameters of the mechanical properties of the wheelset (strength, geometric dimensions of the wheel pair, surface quality). The proposed method for calculating the durability of a wheelset can be applied as a progressive method to ensure the reliability of parts and units of cars, as well as other machines and mechanisms, which will increase the durability of the wheelset, as well as reduce the cost of maintenance and repair of wagons.

Keywords: car, wheelset, durability, safety factor, durability coefficient, strength, resource, reliability, stress.

For citation: Method for calculating the durability of a car wheelset / I. Sh. Elyazov, E. N. Yusifzade, A. B. Bakhshiev, I. D. Huseynov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 3. – P. 109–118. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_3_109.

Сведения об авторах

Элязов Исраил Шукур оглы

Азербайджанский Университет Архитектуры и Строительства, г. Баку, кафедра «Транспорт и логистика», кандидат технических наук, доцент, e-mail: elyazov-62@mail.ru

Юсифзаде Эльчин Назим оглы

Азербайджанский Университет Архитектуры и Строительства, г. Баку, кафедра «Транспорт и логистика», кандидат технических наук, доцент, e-mail: y.n.elchin@gmail.com

Information about the authors

Elyazov Israil Shukur ogly

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Chair «Transport and Logistics», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: elyazov-62@mail.ru

Yusifzade Elchin Nazim ogly

Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Chair «Transport and Logistics», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: y.n.elchin@gmail.com

Бахшиев Акиф Байрам оглы

Азербайджанский Технический Университет,
г. Баку,
кафедра «Энергоэффективность и экологически
чистые энергетические технологии»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: akif_bax@yahoo.com

Гусейнов Ильхам Дильгам оглы

Азербайджанский Технический Университет,
г. Баку,
кафедра «Транспортная логистика и безопасность
дорожного движения»,
старший преподаватель,
e-mail: ilham.huseynov@aztu.edu.az

Bakhshiev Akif Bayram ogly

Azerbaijan Technical University, Baku,
Chair «Energy Efficiency and Environmentally
Clean Energy Technologies»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: akif_bax@yahoo.com

Huseynov Ilham Dilgam ogly

Azerbaijan Technical University, Baku,
Chair «Transport Logistics and Road Safety»,
Senior Lecturer,
e-mail: ilham.huseynov@aztu.edu.az

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 629.43 : 62 – 50 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_119

С. В. Лазаренко

СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОМ НА ОСНОВЕ РЕДУКЦИИ ЗАДАЧИ ЛАГРАНЖА К ИЗОПЕРИМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ *

Аннотация. Процесс функционирования интеллектуальной информационно-управляющей системы представляется семантической сетью типовых ситуаций, каждую из которых возможно описать семантической сетью проблемных субситуаций с соответствующими оптимизационными задачами. Когда динамика протекающих процессов удовлетворяет принципу Гамильтона – Остроградского, синтез управлений на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче приводит к двухточечной краевой задаче, откуда следует множество квазиоптимальных структур управлений. Они могут стать основой построения базы правил. В работе синтезирован один из вариантов закона управления, где для исключения неопределенности выбора его параметра в соответствии с проблемной субституцией использована нечеткая логика. Конструктивность синтезированного интеллектуального закона управления продемонстрирована на примере решения задачи стабилизации скорости поезда с единственным электровозом.

Ключевые слова: закон управления, параметрическая адаптация, проблемная субситуация, синтез, оптимизация, условие максимума функции обобщенной мощности, нечеткая логика, уравнения Лагранжа второго рода.

Для цитирования: Лазаренко, С. В. Синтез интеллектуального закона управления электровозом на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче / С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 119–129. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_119.

Введение

На железнодорожном транспорте ключевыми факторами, которые привели к развитию интеллектуальных систем, стали широкое использование микропроцессорной техники и внедрение современных каналов передачи информации. При этом, по-видимому, первая системная классификация уровней автоматизации управлением движением поездов с точки зрения их интеллектуальности и эксплуатации подвижного состава дана в 2014 году Международным союзом общественного транспорта. В Российской Федерации это нашло отражение в ГОСТ Р 56829–2015. В то же время ГОСТ Р 8.673–2009 относит к интеллектуальным измерительным системам системы, «реализующие метрологический самоконтроль, обеспечивающие автоматическую коррекцию погрешности измерений из-за старения и/или воздействия влияющих величин, а также способные к самообучению для оптимизации алгоритмов работы». Потребители такой информации, как правило, системы управления. В автомобильном транспорте это могут быть системы активной помощи водителю (англ. *ADAS – Advanced Driver Assistance System*), которые в качестве источников первичной измерительной информации кроме радиолокационных датчиков могут дополнительно содержать камеры, лидары и т.д. На железнодорожном транспорте, например, при решении задачи автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке необходимо иметь координаты движущихся поездов. На водном транспорте бортовые и наземные системы управления используются для судовождения и обеспечения его безопасности. Системы управления воздушного транспорта используют параметры движения воздушных объектов для обеспечения безопасности полетов. Поэтому под интеллектуальной информационно-управляющей системой транспорта (ИУС) будем понимать бортовые и наземные информационно-управляющие системы, предназначенные для автоматизированного поиска и принятия к реализации максимально эффективных сценариев управления для безопасной эксплуатации транспортных средств. То-

* Работа подготовлена в рамках научной темы «Разработка беспилотных технологий на основе комплексной поэтапной оптимизации с редукцией экстремальных задач и инструментов нейро-нечеткого моделирования (FZNE-2022-0006)».

гда функционирование ИУС может быть обеспечено только посредством достижения целей ее отдельных компонентов, при формулировке которых принято отождествлять цели подсистем как средства достижения цели системы более высокого уровня [1].

Анализ практики проектирования и эксплуатации ИУС показывает [2, 3], что процесс их функционирования можно представить семантической сетью типовых ситуаций (ТпС). Каждая ТпС характеризуется определенной целью и набором средств – стратегий ее достижения. В соответствии с [2] вся работа ИУС представима через конечное число ТпС, каждую ТпС можно представить через семантическую сеть проблемных субситуаций (ПрС/С), которая описывает все множество путей достижения поставленной в ТпС цели. Каждую ПрС/С можно описать оптимизационной задачей определенного типа, каждая ТпС содержит конечное число значимых событий, прогноз появления которых в пространстве и во времени может осуществляться через математические модели фрагментов ПрС/С. При этом повышение эффективности ИУС связано с преодолением практического противоречия между интеллектуальностью, с ростом которой увеличиваются вычислительные затраты, снижается оперативность, а в конечном итоге уменьшается автономность транспортных средств, и точностью, снижающейся по мере повышения уровня интеллектуальности управления в системе (и наоборот).

Преодоление указанного противоречия на практике требует использования современного научно-методического аппарата синтеза ИУС. В соответствии с теоремой из [3] каждую ПрС/С можно представить через оптимизационную задачу определенного типа, что предполагает применение современной теории автоматического управления [4–9].

Необходимо отметить, что решение задач вариационного исчисления состоит в редукции бесконечномерной экстремальной задачи к задаче поиска изолированных решений дифференциальных уравнений. Дальнейшее развитие теории привело к появлению изопериметрической задачи, которая решается с использованием правила множителей Лагранжа. Многие последующие результаты теории вариационного исчисления определяются постановкой экстремальной задачи, когда дополнительные ограничения задаются дифференциальными уравнениями относительно искомых функций. Такова, например, задача Лагранжа.

Следующий этап развития теории решения экстремальных задач можно связать с игольчатой вариацией, предложенной Макшейном, который на ее основе с использованием теоремы об отделимости выпуклых множеств доказал условие Вейерштрасса для любого решения задачи Лагранжа, что ознаменовало начало периода бурного развития методов выпуклого анализа, положенных в основу теории оптимального управления. Например, теорема об отделимости выпуклых множеств в фазовом пространстве была использована В. Г. Гамкрелидзе, впервые строго доказавшим принцип максимума Л. С. Понтрягина. При этом полученное решение оптимизационной задачи может проходить по границе замкнутого множества допустимых элементов, в то время как условие Вейерштрасса в таких условиях может не выполняться.

Ключевой этап доказательства принципа максимума Л. С. Понтрягина состоял в выборе вариаций управления и доказательства близости соответствующих им решений дифференциального уравнения. Анализ множеств запрещенных и допустимых вариаций в рамках метода Дубовицкого – Милютина позволил получить «локальный» и «глобальный» принцип максимума.

Исследования Л. А. Баранова и его учеников привели к установлению уравнений «принципа максимума в формулировке, предложенной А. А. Милютиным и А. Я. Дубовицким для задач с ограничениями, наложенными на фазовые координаты». Их анализ позволил «выбрать значение скоростей», соответствующих оптимальным по расходу энергии на тягу режимам управления движением поезда. Это стало конструктивной основой энергоэффективного управления подвижным составом [4, 5]. При этом многие глубокие теоретические результаты в области синтеза управлений связаны с исследованием решений дифференциальных уравнений и носят преимущественно абстрактный характер, поскольку они зачастую не приводят к получению принципиально новых результатов и не отличаются простотой.

В связи с этим А. А. Красовский констатировал «кризис современной теории управления в последней четверти XX века». К числу важнейших направлений современной прикладной теории управления он отнес «физическую теорию управления», опирающуюся на физические законы. Данная теория получила развитие в трудах П. Д. Крутько, который использовал свойства уравнений Лагранжа второго рода, описывающих динамику исследуемого объекта, при решении обратных задач динамики на основе минимизации локальных функционалов. Однако применение этого подхода для решения задач синтеза оптимальных систем осложняется наличием неопределенности в выборе функции обратной связи, рекомендации по определению которой на данный момент не получены. В работах

И. М. Ананьевского, Ф. Л. Черноусько получены управления, близкие к оптимальным, если величины возмущений и нелинейностей в системе оказываются малыми.

В силу изложенного проблема синтеза законов управления лагранжевыми динамическими системами по настоящее время не разрешена в общем виде и является одной из центральных задач теории и практики управления.

В этой связи необходимо отметить, что Д. Е. Охоцимский в 1947 году на основе анализа первой вариации построенного им вспомогательного функционала модифицировал метод множителей Лагранжа для случаев, когда решение задачи управления частично или полностью совпадает с границами области допустимых функций. Как показано в последующих исследованиях Ю. Ф. Голубева, «метод первой вариации обладает значительной гибкостью в смысле возможности учета разнообразных дополнительных к базовой модельной постановке ограничений, свойственных проектным задачам» [10]. С целью развития этого подхода при решении задач синтеза управлений лагранжевыми динамическими системами в работе [9] предложено для построения расширенного функционала использовать редукцию задачи Лагранжа к изопериметрической задаче, порождающей множество решений [9, 11, 12], которое предлагается положить в основу построения базы правил ИУС [13].

Цель исследования – синтез интеллектуального закона управления лагранжевой динамической системой на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче.

1 Постановка задачи

Полагается, что для ИУС задано:

а) множество проблемных субситуаций (ПрС/С) $PS = \{PS_j, j = \overline{1, n_{PS}}\}$, возникающих при функционировании. При этом каждой ПрС/С $PS_j \in PS$ соответствует заранее определенный экспертным или иным путем ситуационный вектор

$$SV_j \in SV, \quad SV = \{SV_j, j = \overline{1, n_{PS}}\}, \quad SV_j = [sv_{jk}, k = \overline{1, K}]^T, \quad (1)$$

где sv_{jk} – лингвистическая переменная с множеством термов $SV_{[k]}^l = \{SV_{[k]}^l, l = \overline{1, m_{Lk}}\}$. В произвольный момент времени функционирования ИУС текущая ситуация характеризуется вектором $sv \in SV$, $sv = [sv_k, k = \overline{1, K}]^T$;

б) множество известных прецедентов (правил) $PV = \{pv_m, m = \overline{1, m_{PV}}\}$, каждый элемент которого $pv_m = [pv_{mq}, q = \overline{1, Q}]^T$ связан с решением конкретной оптимизационной задачи ПрС/С, описываемой ситуационным вектором $SV_j \in SV$ ($m_{PV} = n_{PS}$), или группы ПрС/С $\{SV_i, i = \overline{1, n_m}\} \in SV$, ($m_{PV} < n_{PS}$);

в) возможные механизмы выбора рационального решения текущей ПрС/С в виде системы правил, которая в компактном виде может быть представлена так:

$$R^{m_r} : \text{если } sv_1 \text{ есть } SV_1^{m_r} \text{ и } sv_2 \text{ есть } SV_2^{m_r} \dots sv_K \text{ есть } SV_K^{m_r}, \text{ то } pv_m, \\ m = \overline{1, m_{PV}}, r_m = \overline{1, n_m}, n_m \in 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $SV_k^{m_r}, k = \overline{1, K}, m = \overline{1, m_{PV}}$ – нечеткие множества – конкретные лингвистические значения входной переменной sv_k в составе m_r -го правила:

$$SV_{k_{sv}}^{m_r} \subset R, \quad SV_{k_{sv}}^{m_r} \in \{SV_{[k_{sv}]}^l, l = \overline{1, m_{Lk}}\}, k_{sv} = \overline{1, K}.$$

Положим, что в (1) правила R^{m_r} связаны логическим оператором <ИЛИ> [15]; явная схема вывода

$$R^j : \text{если } PS_j, \text{ то } PV_j, \quad j = \overline{1, n_{PS}}, \quad (3)$$

где правила R^j по аналогии с (1) связаны логическим оператором <ИЛИ>;

г) модель измерительной системы

$$L_{\text{ИЗМ.SV}} : \{\mathbf{x}, \mathbf{u}\} \rightarrow \mathbf{y}, \quad (4)$$

где $L_{\text{ИЗМ.SV}}$ – оператор измерения; $\mathbf{x}(t) = [x_i, i = \overline{1, r}]^T \in \mathbb{R}^r$ – случайный вектор состояния; t – время, $t \in [t_0, t_1] \subset \mathbb{R}$; t_0 – момент времени начала наблюдений; t_1 – момент времени окончания наблюдений; $\mathbf{u}(t) = [u_i, i = \overline{1, k}]^T \in \mathbb{R}^k$ – неизвестный детерминированный вектор возмущений (управлений), определяющий нестационарность протекающих процессов; $\mathbf{y}(\mathbf{x}, t) = [y_j, j = \overline{1, n_y}]^T \in \mathbb{R}^{n_y}$ – вектор-функция наблюдений; \mathbb{R} – символ, который здесь и далее обозначает гильбертово пространство соответствующей размерности; T – знак транспонирования. Векторы состояния и управления соответственно содержат элементы, которые образуют ситуационный вектор $(sv_{jk} \in [\mathbf{x}^T, \mathbf{u}^T]^T)$;

д) показатели и критерии эффективности функционирования ИУС.

В общем случае под показателем эффективности понимают количественную меру интенсивности проявления свойства эффективности системы. Показатели эффективности характеризуют результат использования системы по целевому назначению и определяются следующими факторами: выходным полезным эффектом W_3 , затратами ресурсов C и времени t . Если обозначить результат функционирования ИУС как функцию $Y(W_3, C, t)$, а требуемый результат – $Y_{\text{ТР}}$, то в качестве показателя эффективности можно использовать функцию соответствия $f(Y(W_3, C, t), Y_{\text{ТР}})$, которая определяет потери при отличии $Y(W_3, C, t)$ от $Y_{\text{ТР}}$. Так как функция соответствия в общем случае является случайной, то в качестве показателя эффективности принимают средние потери.

Однако практика показывает, что обобщенный показатель эффективности указанного вида обладает слабой вычислимостью и его сложно использовать.

Учитывая, что показатель эффективности ИУС является количественной мерой ее качества, т.е. совокупности полезных свойств, эффективность будет характеризоваться совокупностью частных показателей. Все показатели эффективности ИУС условно можно разделить на три группы: показатели эффективности решения целевых задач (точность, оперативность, пропускная способность и т.д.), показатели устойчивости ИУС к возмущающим факторам, показатели расхода ресурсов за период жизненного цикла ИУС. Наличие совокупности разнородных показателей приводит к необходимости решения многокритериальных задач по векторной оценке, эффективности ИУС, что значительно снижает оперативность и доступность принятия решения об эффективности. Для устранения данной проблемы используют метод скаляризации векторного показателя эффективности.

В рамках построения ИУС в соответствии с теоремой из [4] для решений оптимизационных задач можно использовать традиционные критерии. В задачах синтеза управлений целевая функция конкретизируется в соответствии со спецификой решаемой задачи, однако ее, как правило, стараются выбирать так, чтобы она была положительно определенной и непрерывной по совокупности аргументов;

е) ограничения и допущения: динамика протекающих процессов описывается уравнением Лагранжа второго рода [1], из которого с использованием процедуры расширения пространства состояний имеем: $\mathbf{x}^T = [q_1 \quad \dot{q}_1 \quad \dots \quad q_n \quad \dot{q}_n]$, где q_s – обобщенная координата, $s = \overline{1, n}$, n – число степеней свободы; точками обозначены производные по времени.

Требуется на основе анализа ситуационного вектора $SV_j \in SV$, описывающего формализованную с точностью до вектора управления $\mathbf{u} \in \bar{G}$ модель объекта управления, синтезировать интеллектуальный закон управления лагранжевой динамической системой на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче.

2 Синтез квазиоптимальных управлений лагранжевыми системами

Для решения поставленной задачи необходимо синтезировать управления динамическими системами, описываемыми уравнениями Лагранжа второго рода. Для них в работе [9] на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче установлено, что на траектории, доставляющей экстремум целевому функционалу с подынтегральной определенно-положительной целевой функцией $F(\mathbf{q})$, справедлива следующая система:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_s} = u_s, \mathbf{u} \in \bar{G}, q_s(t_0) = q_{s0}, \dot{q}_s(t_0) = \dot{q}_{s0}, q_s(t_1) = q_{s1}, \dot{q}_s(t_1) = \dot{q}_{s1}, \\ \Phi = \sum_{s=1}^n \left(u_s - \lambda^{-1} \frac{\partial F}{\partial q_s} \right) \dot{q}_s(t) \rightarrow \max, t \in [t_0, t_1], \left[(A - T) + \lambda^{-1} F \right]_{t_0}^{t_1} = 0, \lambda = \text{const}, s = 1, n, \end{cases} \quad (5)$$

где T – кинетическая энергия; u_s – управление, разыскиваемое в замкнутом множестве \bar{G} суммируемых на любом конечном интервале функций; $(t_1 - t_0)$ – время, за которое управления переводят лагранжеву динамическую систему из начального состояния в конечное состояние; λ – множитель Лагранжа; A – работа обобщенных сил.

Исследование ограничено рассмотрением случая, когда кинетическая энергия является квадратичной формой обобщенных скоростей, матрица коэффициентов кинетической энергии – положительно определенная квадратичная форма с коэффициентами, которые равномерно ограничены по всем обобщенным координатам вместе с частными производными первого порядка. Как следует из [16], в таких условиях для управляемой лагранжевой динамической системы [8] в соответствии с (5) и принципом декомпозиции справедливо положить:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s + \lambda^{-1} [\mu_s \dot{q}_s - V_s], \quad (6)$$

где Q_s – составляющая обобщенной силы, не зависящая от управляющих обобщенных сил $u_s = \lambda^{-1} \left[\mu_s \dot{q}_s + \frac{\partial F}{\partial q_s} \right]$; μ_s – синтезирующая функция.

Синтезированные на основе (6) управления имеют оригинальную структуру, отличающуюся от решений П. Д. Крутько, Е. С. Пятницкого, В. И. Матюхина за счет различных форм синтезирующей функции. Методы построения синтезирующей функции базируются на использовании инвариантов, выбор которых определяет структуру обратной связи и обеспечивает учет физических свойств объекта управления.

Таким образом, решение краевой задачи (5) сводится к установлению структуры синтезирующей функции. Согласно [13]

$$\mu_s = \frac{L |\dot{q}_s|}{|q_s| + \varepsilon}, \quad (7)$$

где L, ε – параметры, позволяющие менять линию переключения в зависимости от текущего положения динамической системы на фазовой плоскости.

3 Синтез и математическое моделирование закона управления интеллектуальной информационно-управляющей системы электровоза

Полагается, что движение подвижного состава в режиме тяги характеризуется двумя ПрС/С: PS_1 – режим движения с малыми отклонениями текущей скорости от заданной, PS_2 – режим движения с большими отклонениями текущей скорости от заданной. Соответствующая интеллектуальная система управления может быть задана так [14]:

$$\begin{aligned} R^1 &: \text{если } PS_1, \text{ то } F_{\text{тяги}} = u^1, \\ R^2 &: \text{если } PS_2, \text{ то } F_{\text{тяги}} = u^2. \end{aligned} \quad (8)$$

При этом необходимо отметить, что при малых отклонениях контролируемой величины от заданной традиционные решения, например, пропорционально-дифференциальные или пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД)-регуляторы, могут быть достаточно эффективны [15].

Было принято, что модель измерительной системы (4) близка к идеальной, т.е. погрешность измерений пренебрежимо мала. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что, например, по результатам испытаний в Италии технологии определения местоположения поездов на основе сверхширокополосной радиосвязи погрешность измерения состояния составила $\pm 0,3$ м, а скорости во время движения поезда $\pm 0,56$ мс⁻¹.

При решении задачи стабилизации в случае постоянной скорости с учетом введенных ограничений и допущений при $n = 1$ цель управления может задаваться так:

$$F = (q - \dot{q}^* t)^2 = \Delta q^2, \quad (9)$$

где q – обобщенная координата, описывающая изменение состояния поезда; \dot{q}^* – заданная скорость движения, которой соответствует обобщенная координата q^* .

Ставится задача синтеза законов управления u^j , $j = 1, n_{PS}$, стабилизирующих скорость поезда с единственным электровозом в режиме тяги [5]. Соответствующее уравнение Лагранжа второго рода имеет вид [12]:

$$M\ddot{q} = F_{\text{тяги}}(q, \dot{q}) - R(q, \dot{q}), \quad (10)$$

где $M = \frac{1000(P + Q')}{g}$ – масса поезда, P – вес локомотива, Q' – вес состава, g – ускорение свободного падения; $F_{\text{тяги}}(q, \dot{q})$ – сила тяги или электрического торможения, развиваемая электровозом; в случае одиночной тяги $F_{\text{тяги}}(q, \dot{q})$ равна силе тяги или электрического торможения единственного электровоза в поезде; $R(q, \dot{q})$ – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления движению, которая задается следующим образом:

$$\begin{aligned} R(q, \dot{q}) &= W_{\text{осн}}(\dot{q}) + W_{\text{п}}(q), \\ W_{\text{осн}}(\dot{q}) &= w_{\text{лок}}(\dot{q})P + w_{\text{сост}}(\dot{q})Q', \end{aligned} \quad (11)$$

где $W_{\text{осн}}(\dot{q})$ – полное основное сопротивление поезда; $W_{\text{п}}(q)$ – силы, зависящие от уклона профиля пути; $w_{\text{лок}}(\dot{q})$ – удельное сопротивление локомотива; $w_{\text{сост}}(\dot{q})$ – удельное сопротивление пассажирского состава.

Для исследования рассмотрим электровоз ЭП20, для которого примем [12]:

$$\begin{aligned} P &= 1265 \text{ Н}, \quad Q' = 12740 \text{ Н}, \\ w_{\text{лок}} &= 2,4 + 0,011\dot{q} + 0,00035\dot{q}^2, \\ w_{\text{сост}} &= \frac{0,7 + (8 + 0,18\dot{q} + 0,003\dot{q}^2)}{160}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для математического моделирования движения выбран участок пути Рязань – Воронеж. Его профиль пути представлен на рис. 1.

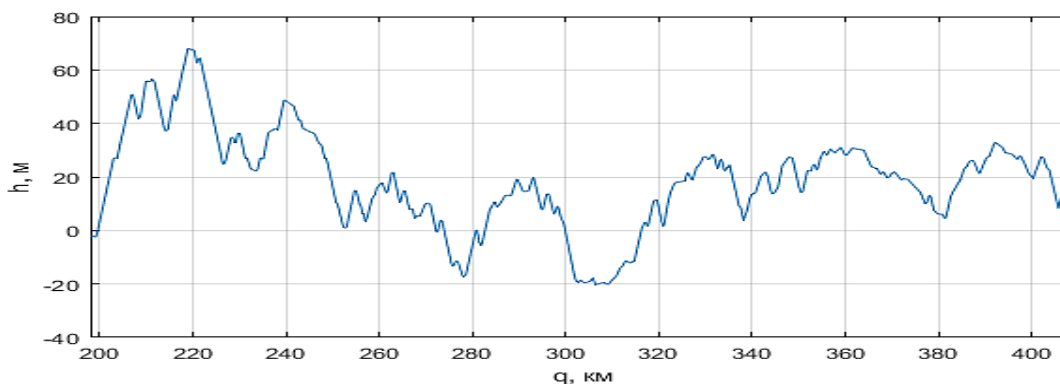


Рис. 1. Профиль пути Рязань – Воронеж

В соответствии с (10) обобщенная координата q^* удовлетворяет следующему уравнению Лагранжа второго рода:

$$M\ddot{q}^* = F_{\text{тяги}}^*(q^*, \dot{q}^*) - R^*(q^*, \dot{q}^*), \quad (13)$$

где $F_{\text{тяги}}^*(q^*, \dot{q}^*)$ – сила тяги или электрического торможения единственного локомотива в поезде на невозмущенной траектории; $R^*(q^*, \dot{q}^*)$ – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления невозмущенного движения, для которой справедливы выражения (11).

Из (10) и (13) вытекает разрешенное относительно старшей производной уравнение Лагранжа второго рода в новых координатах:

$$\Delta\ddot{q} = -M^{-1} \left(\left(\frac{\partial W_{\text{осн}}(q^*)}{\partial \dot{q}^*} + \frac{\partial W_{\text{осн}}(f(\dot{q}^{*2}))}{\partial \dot{q}^*} \frac{f(\dot{q}^{*2})}{\partial \dot{q}^*} \right) \Delta\dot{q} + \frac{\partial W_{\text{п}}(q^*)}{\partial q^*} \Delta q + O(\Delta\dot{q}^{*2}) + O(\Delta q^{*2}) \right) - M^{-1} (F_{\text{тяги}}^*(q, \dot{q}) - F_{\text{тяги}}^*(q^*, \dot{q}^*)), \quad (14)$$

где $f(\dot{q}^{*2})$ – нелинейная составляющая сопротивления поезда; $O(\Delta\dot{q}^{*2}), O(\Delta q^{*2})$ – бесконечно малые более высокого порядка, чем соответственно $\Delta\dot{q}$ и Δq . В соответствии с (6) в таком случае $u = -M^{-1} (F_{\text{тяги}}^*(q^* + \Delta q, \dot{q}^* + \Delta\dot{q}) - F_{\text{тяги}}^*(q^*, \dot{q}^*))$.

Вариант реализации (8) не единственный, например, по аналогии с [13] для R^1 и R^2 для разных областей фазового пространства можно использовать различные управления. В настоящем исследовании в соответствии с (7) для базы правил ИУС предлагается следующее решение [9, 13]:

$$-M^{-1} (F_{\text{тяги}}^*(q^* + \Delta q, \dot{q}^* + \Delta\dot{q}) - F_{\text{тяги}}^*(q^*, \dot{q}^*)) = -\lambda^{-1} \left(\frac{L|\Delta\dot{q}|\Delta\dot{q}}{|\Delta q| + \varepsilon_j(\Delta\dot{q})} + 2\Delta q \right), \quad j = \overline{1, n_{PS}}. \quad (15)$$

Отсюда с учетом ограничений [9, 15] получим интеллектуальный закон управления:

$$u^j = -\text{sat} \left(\frac{L|\Delta\dot{q}|\Delta\dot{q}}{|\Delta q| + \varepsilon_j(\Delta\dot{q})} + 2\Delta q \right), \quad (16)$$

где sat – функция насыщения.

Неопределенность выбора параметра ε_j в соответствии с одной из n_{PS} ПрС/С формализуется $n_{PS} - 1$ входными лингвистическими переменными. Тогда параметр рассчитывается так [14]:

$$\varepsilon_j(\Delta\dot{q}) = \sum_{j=1}^{n_{PS}} (\beta_j m_j(\Delta\dot{q})), \quad (17)$$

где β_j – выходные значения, определенные для области, формализуемой функциями принадлежности $m_j(\Delta\dot{q})$ соответственно; $\sum_{j=1}^{n_{PS}} m_j(\Delta\dot{q}) = 1$.

В рассматриваемом случае лингвистическая переменная – это «отклонение текущей скорости от постоянной заданной» с терм-множеством $T_1 = \{\text{"мало"}, \text{"много"}\}$. Для определенности положим [14]

$$m_1(\Delta\dot{q}) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \Delta\dot{q} < p_1, \\ \frac{p_2 - \Delta\dot{q}}{p_2 - p_1}, & p_1 \leq \Delta\dot{q} \leq p_2, \\ 0, & p_2 < \Delta\dot{q}, \end{cases} \quad (18)$$

$$p_1 = \text{const} > 0, \quad p_2 = \text{const} > 0, \quad m_2(\Delta\dot{q}) = 1 - m_1(\Delta\dot{q}).$$

Оценка эффективности (16) проводилась на основе математического моделирования. Синтезированный интеллектуальный закон управления сравнивался с учитывающим ограничения уровня и скорости изменения сигнала управления ПИД-регулятором [15]. Соответствующий фазовый портрет изображен на рис. 2, где сплошными линиями изображены фазовые траектории интеллектуального закона управления для различных начальных условий, пунктирной линией нарисованы фазовые траектории

учитывающего ограничения уровня и скорости изменения сигнала управления ПИД-регулятора для различных начальных условий, символами «x» обозначены координаты $(\Delta\dot{q}(t_0), \Delta\dot{q}(t_0))$ четырех наборов начальных данных, символом «o» обозначено терминальное состояние.

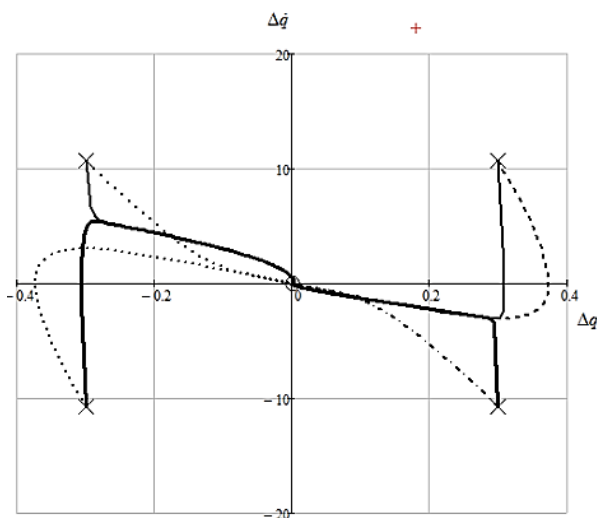


Рис. 2. Фазовый портрет

Результаты расчетов показали, что синтезированный закон управления (16) в сравнении с учитывающим ограничения уровня и скорости изменения сигнала управления ПИД-регулятором обеспечивает относительный выигрыш по квадратичному критерию $J = \int_{t_0}^{t_1} F dt$ и показателю $J_v = \int_{t_0}^{t_1} \Delta\dot{q}^2 dt$. Так, в первом квадранте выигрыш соответственно 46,6 и 46,4 %, во втором квадранте 2,9 и 3,6 %, в третьем квадранте 0,6 и 2,9 %, в четвертом квадранте 49,3 и 49,2 %. Для повышения эффективности синтезированного интеллектуального управления во втором и третьем квадрантах фазовой плоскости необходимо увеличивать число лингвистических переменных [17], что приведет к усложнению расчета параметра $\varepsilon_j(\Delta\dot{q})$.

Заключение

Анализ научно-методического аппарата синтеза управлений показал, что классические методы решения оптимизационных задач достигли определенного предела в улучшении показателей качества ИУС. При этом в условиях неопределенности управление должно осуществляться на основе обобщения и классификации ситуаций, информация о которых представляется на естественном языке и обрабатывается на семантическом уровне. Эффективность таких процедур управления во многом обусловлена тем, что она близка к мыслительным процедурам построения ситуационных концепций, применяемых выполняющим функции управления оператором.

В общем случае ИУС, как и любая интеллектуальная система, должна иметь в своем составе следующие основные блоки: база правил, база данных, механизмы самообучения и накопления новых знаний о мире. База правил может строиться по результатам исследований оптимизационных задач, адекватных рассматриваемым ПрС/С.

Решение оптимизационных задач лагранжевых систем с использованием интеграла действия как ограничения приводит к изопериметрической задаче отыскания условий минимума расширенного интеграла действия. «Результат анализа асинхронной (полной) вариации соответствующего функционала» [9] аналогично использованию метода Охочимского – Понтрягина и формализма Дубовицкого – Милутина – краевая задача, отличающаяся стесняющими условиями энергетического баланса и максимума функции обобщенной мощности. Разрешение двухточечной краевой задачи (5) возможно «...не единственным способом, что порождает множество решений. В отдельных случаях удастся установить их связь с известными результатами теории оптимального управления и аналитической механики» [9].

Математическое моделирование подтвердило, что применение нечеткой логики позволяет синтезировать интеллектуальный закон управления, способный адаптироваться к возмущениям, которые

сопутствуют прикладным задачам в области транспорта [4, 5]. Квазиоптимальные решения полученной в [9] краевой задачи могут обеспечить построение базы правил для ИУС [18].

Список литературы

- 1 **Иванов, Н. М.** Назначение и состав баллистико-навигационного обеспечения в структуре технологии управления космическим полетом / Н. М. Иванов, Л. Н. Лысенко // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2004. – № 2. – С. 137–150. – ISSN 1029-3620.
- 2 **Федунов, Б. Е.** Бортовые оперативно-советующие системы для антропоцентрических объектов / Б. Е. Федунов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2003. – № 6. – С. 145–152. – ISSN 1029-3620.
- 3 **Федунов, Б. Е.** Проблемы разработки бортовых оперативно-советующих экспертных систем для антропоцентрических объектов / Б. Е. Федунов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 5. – С. 147–159. – ISSN 1029-3620.
- 4 Принципы построения и модели системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, О. Е. Пудовиков // Автоматика на транспорте. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 377–388. – DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388.
- 5 Минимизация расхода энергии на тягу поездов внеуличного городского транспорта / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, А. И. Сафронов // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 26–34. – DOI 10.53891/00135860_2021_9_26.
- 6 **Furtat, I. B.** Robust adaptive control with disturbances compensation : 12th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing ALCOSP 2016 / I. B. Furtat, J. V. Chugina // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, No. 13. – P. 117–122. – DOI 10.1016/j.ifacol.2016.07.937.
- 7 **Ананьевский, И. М.** Непрерывное управление механической системой на основе метода декомпозиции / И. М. Ананьевский, С. А. Решмин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 3–17. – DOI 10.7868/S0002338814040027.
- 8 **Пятницкий, Е. С.** Синтез иерархических систем управления механическими и электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I / Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1989. – Т. 50, № 1. – С. 87–99. – ISSN 0005-1179.
- 9 **Костоглотов, А. А.** Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической

References

- 1 **Ivanov, N. M.** The goal and structure of ballistic and navigational support in the structure of space flight control technology / N. M. Ivanov, L. N. Ly-senko // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 2004. – No. 2. – P. 288–301. – ISSN 1064-2307.
- 2 **Fedunov, B. E.** Onboard operational-advisory systems for anthropocentric objects / B. E. Fedunov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 2003. – No. 6. – P. 966–972. – ISSN 1064-2307.
- 3 **Fedunov, B. E.** Problems of the development of on-board operational-advisory expert systems for anthropocentric objects / B. E. Fedunov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 1996. – No. 5. – P. 147–159. – ISSN 1064-2307.
- 4 Design principles and models of automatic control system for the second locomotive with virtual coupling / L. A. Baranov, P. F. Bestemyanov, E. P. Balakina, O. E. Pudovikov // Automation in transport. – 2022. – Vol. 8, No. 4. – P. 377–388. – DOI 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388.
- 5 Minimization of energy consumption for traction of trains of off-street urban transport / L. A. Baranov, V. G. Sidorenko, E. P. Balakina, A. I. Saf-ronov // Electrotechnics. – 2021. – No. 9. – P. 26–34. – DOI 10.53891/00135860_2021_9_26.
- 6 **Furtat, I. B.** Robust adaptive control with disturbances compensation : 12th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing ALCOSP 2016 / I. B. Furtat, J. V. Chugina // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, No. 13. – P. 117–122. – DOI 10.1016/j.ifacol.2016.07.937.
- 7 **Ananevskii, I. M.** Continuous control of a mechanical system based on the decomposition method / I. M. Ananevskii, S. A. Reshmin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 2014. – No. 4. – P. 3–17. – DOI 10.7868/S0002338814040027.
- 8 **Pyatnitsky, E. S.** Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and electromechanical objects based on the principle of decomposition. I / E. S. Pyatnitsky // Automation and telemechanics. – 1989. – Vol. 50, No. 1. – P. 87–99. – ISSN 0005-1179.
- 9 **Kostoglotov, A. A.** Method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to the isoperimetric problem using asynchronous variation / A. A. Kostoglotov,

задаче с использованием асинхронного варьирования / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6, № 6. – С. 3–12. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

10 **Голубев, Ю. Ф.** Метод Охоцимского – Понтрягина в теории управления и аналитической механике. Часть 1 : Метод Охоцимского – Понтрягина в аналитической механике / Ю. Ф. Голубев // Вестник Московского университета. Серия 1 : Математика. Механика. – 2008. – № 6. – С. 38–44. – ISSN 0579-9368.

11 **Костоглотов, А. А.** Синтез модели процесса с нестационарными возмущениями на основе максимума функции обобщенной мощности / А. А. Костоглотов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко // Математическое моделирование. – 2016. – № 12. – С. 133–142. – ISSN 0234-0879.

12 **Агапов, А. А.** Возможность использования интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности в системе автоматического регулирования скорости электровоза / А. А. Агапов, А. А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (91). – С. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

13 **Андрашитов, Д. С.** Метод синтеза интеллектуальных управлений на основе анализа поведения динамических мер на гиперповерхности переключения в областях фазового пространства с нечеткими границами / Д. С. Андрашитов, А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Нейрокомпьютеры : разработка, применение. – 2020. – № 1. – С. 46–54. – DOI 10.18127/j19998554-202001-05.

14 **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

15 **Кузнецов, Н. В.** Методы подавления нелинейных колебаний в астатических системах автопилотирования летательных аппаратов / Б. Р. Андриевский, Н. В. Кузнецов, Г. А. Леонов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 455–470. – DOI 10.1134/S1064230717030042.

16 Анализ и синтез нелинейных многорежимных законов управления с использованием объединенного принципа максимума / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко [и др.] // Brief Summary of the Journal. – 2019. – № 1. – P. 119–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

S. V. Lazarenko // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 2021. – Vol. 6, No. 6. – P. 3–12. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

10 **Golubev, Yu. F.** The Okhotsimskii – Pontryagin method in control theory and analytical mechanics. Part 1 : Okhotsimskii – Pontryagin method in analytical mechanics / Yu. F. Golubev // Moscow University Bulletin. Series 1 : Mathematics. Mechanics. – 2008. – No. 6. – P. 38–44. – ISSN 0579-9368.

11 **Kostoglotov, A. A.** Synthesis of a process model with non-stationary disturbances based on the maximum of the generalized power function / A. A. Kostoglotov, A. A. Kuznetsov, S. V. Lazarenko // Mathematical Modeling. – 2016. – No. 12. – P. 133–142. – ISSN 0234-0879.

12 **Agapov, A. A.** The possibility of using an intelligent control algorithm based on the maximum condition of the generalized power function in the system of automatic speed control of an electric locomotive / A. A. Agapov, A. A. Jr. Zarifyan // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

13 **Andrashitov D. S.** The method for synthesis of intelligent controls based on the analysis of the behavior of dynamic measures on a switching hypersurface in regions of phase space with fuzzy boundaries / D. S. Andrashitov, A. A. Kostoglotov, S.V. Lazarenko // Neurocomputers: development, application. – 2020. – No. 1. – P. 46–54. – DOI 10.18127/j19998554-202001-05.

14 **Pegat, A.** Fuzzy modeling and control / A. Pegat. – Moscow : BINOM. Knowledge Laboratory, 2013. – 798 p. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

15 **Kuznetsov, N. V.** Methods for suppressing nonlinear oscillations in astatic autopilot systems of aircraft / B. R. Andrievsky, N. V. Kuznetsov, G. A. Leonov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 2017. – No. 3. – P. 455–470. – DOI 10.1134/S1064230717030042.

16 Analysis and synthesis of nonlinear multi-mode control laws using the united maximum principle / A. A. Agapov, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko [et al.] // Brief Summary of the Journal. – 2019. – No. 1. – P. 119–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

17 Алгоритм адаптивной настройки параметров линейного дискретного фильтра с использованием нечеткой экспертной системы / А. В. Елисеев, К. В. Ануфриев, Р. А. Погорелов, Д. Э. Рубайло // Радиотехника. – 2019. – № 7. – С. 89–102. – DOI 10.18127/j00338486-201907(9)-10.

17 The algorithm of adaptive adjustment of the parameters of the linear discrete filter using fuzzy expert system / A. V. Eliseev, K. V. Anufriev, R. A. Pogorelov, D. E. Rubailo // Radio engineering. – 2019. – No. 7. – P. 89–102. – DOI 10.18127/j00338486-201907(9)-10.

S. V. Lazarenko

SYNTHESIS OF AN INTELLIGENT LAW OF ELECTRIC LOCOMOTIVE CONTROL BASED ON THE REDUCTION OF THE LAGRANGE PROBLEM TO AN ISOPERIMETRIC PROBLEM

Abstract. The process of functioning of an intelligent information and control system is represented by a semantic network of typical situations, each of which can be described by a semantic network of problem subsituations with corresponding optimization tasks. When the dynamics of the ongoing processes satisfies the Hamilton-Ostrogradsky principle, the synthesis of controls on the basis of the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem leads to a two-point boundary value problem, from which follows a set of quasi-optimal control structures. They can form the basis for the construction of a rule base. In this re-search paper, one of the variants of the control law is synthesized, where fuzzy logic is used to eliminate the uncertainty of the choice of its parameter according to the problem substitution. The constructiveness of the synthesized intelligent control law is demonstrated by the example of solving the problem of stabilizing the speed of a train with a single electric locomotive.

Keywords: control law, parametric adaptation, problem substitution, synthesis, optimization, maximum condition for the generalized power function, fuzzy logic, Lagrange equations of the second kind.

For citation: Lazarenko, S. V. Synthesis of an intelligent law of electric locomotive control based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem / S. V. Lazarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 119–129. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_119.

Сведения об авторах

Лазаренко Сергей Валерьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном транспорте»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: lazarenkosv@icloud.com

Information about the authors

Lazarenko Sergey Valeryevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway
Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: lazarenkosv@icloud.com

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311.001.57

DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_130

*М. М. Никифоров, С. Г. Шантаренко***ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЯГИ ПОЕЗДОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Аннотация. В статье представлены результаты разработки новых научно обоснованных технических и технологических решений по снижению энергетических потерь, повышению энергообеспечения, эффективности и устойчивости электротяги поездов за счет совершенствования условий взаимодействия и технологий эксплуатации системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава для обеспечения энергетической безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте.

Решены задачи мониторинга, оценки и прогнозирования состояния энергетической безопасности; определения ресурсов, необходимых для предотвращения угроз энергетической безопасности, что является основой системы управления рисками в области энергетической безопасности электротяги поездов.

Применение полученных научных положений и методов позволяет определять исходные требования для разработки технических условий на проектирование систем тягового электроснабжения, обеспечивающих энергоэффективное и устойчивое электропитание тяги поездов; выполнять оценку энергетической эффективности и корректировку технических и технологических решений по энергосберегающей эксплуатации оборудования тяговых подстанций и электроподвижного состава.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, тяга поездов, система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, потери (небаланс) электроэнергии, энергия рекуперации, энергосбережение, энергетическая эффективность тяги поездов.

Для цитирования: Никифоров, М. М. Обеспечение энергетической безопасности электротяги поездов на железнодорожном транспорте / М. М. Никифоров, С. Г. Шантаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 130–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_130.

Понятие «энергетическая безопасность» было сформулировано Международным энергетическим агентством после нефтяного кризиса в 1973 г. как «уверенность в том, что энергия будет в распоряжении в том количестве и того качества, которые требуются при данных экономических условиях» [1]. Энергетическая безопасность (ЭБ) – это состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии и нарушений бесперебойности энергоснабжения.

Одним из главных факторов, характеризующих энергетическую безопасность, является способность экономики (потребителей топливно-энергетических ресурсов) рационально (бережно) расходовать энергоресурсы и соответственно ограничивать свой спрос.

Если энергетическая безопасность – это фактически бездефицитность энергетического баланса, то она определяется не только достаточностью предложения топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), что является главной задачей топливно-энергетического комплекса (ТЭК), но и в равной мере умеренностью спроса, энергоэффективностью потребителей. Одним из важнейших принципов обеспечения ЭБ называют «предотвращение нерационального использования ТЭР (взаимосвязь с политикой энергетической эффективности)» [2].

Согласно Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216 (далее – Доктрина ЭБ), одной из целей обеспечения энергетической безопасности является поддержание защищенности экономики от угроз энергетической безопасности за счет обеспечения энергосбережения и повышения энергетической эффективности, что является важнейшим направлением в основной деятельности ОАО «РЖД» по осуществлению перевозочного процесса. Кроме того, среди задач по совершенствованию государственного управления в области обеспечения энергетической безопасности можно выделить стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности экономики, одной из важнейших отраслей которой является железнодорожный транспорт.

Основным видом энергии, используемой на федеральном железнодорожном транспорте для осуществления перевозочного процесса, является электрическая энергия.

Таким образом, энергосбережение и повышение энергетической эффективности электротяги поездов являются важнейшими факторами обеспечения энергетической безопасности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте.

В настоящее время в ОАО «РЖД» большое внимание уделяется вопросам энергосбережения и повышения энергетической эффективности производственной деятельности, при этом важнейшим направлением является тяга поездов, на которую приходится более 80 % затрат на приобретение компанией ТЭР. Тем не менее вопрос оперативной оценки фактической энергетической эффективности тяги поездов в настоящее время полностью не решен. Главным образом это связано со сложным характером зависимости расхода электроэнергии локомотивом от различных влияющих факторов, что требует применения сложного математического аппарата.

Прогнозируемое увеличение объемов перевозок грузов по Восточному полигону требует усиления системы тягового электроснабжения (СТЭ) для ликвидации «узких» мест, т. к. большая часть участков на Восточном полигоне на перспективу до 2030 года относится к лимитирующим именно по условиям работы СТЭ. И здесь необходимо обеспечивать условия для равномерной загрузки тяговых подстанций, снижения перетоков энергии, смещения точки токораздела относительно центра межподстанционных зон, что позволит снизить уровень технических потерь электроэнергии на тягу поездов и повысить эффективность работы системы тягового электроснабжения.

При этом необходимо учитывать перспективы внедрения технологии интервального регулирования движения поездов, планируемые массы составов, размеры движения и объемы поездной работы, появление электроподвижного состава (ЭПС) новых серий повышенной мощности, существующие характеристики СТЭ и перспективы развития системы внешнего электроснабжения (СВЭ) Восточной Сибири и Дальнего Востока. Все это позволит повысить уровень энергосбережения и энергетической эффективности как факторов энергетической безопасности электротяги поездов.

Согласно Доктрине ЭБ в целях своевременного реагирования на вызовы и угрозы энергетической безопасности необходимо создание системы управления рисками в области энергетической безопасности, основными задачами которой должны являться:

- а) мониторинг, оценка и прогнозирование, в том числе в долгосрочной перспективе, состояния энергетической безопасности;
- б) определение ресурсов, необходимых и достаточных для предотвращения угроз энергетической безопасности, снижения вероятности их реализации, а также для минимизации последствий их реализации;
- в) определение задач субъектов энергетической безопасности и планирование мер по ее обеспечению;
- г) контроль за реализацией мер по обеспечению энергетической безопасности и оценка их эффективности.

Критической особенностью электротяги поездов является тот факт, что обеспечение ее энергетической безопасности зависит от надежности и бесперебойности работы электрогенерирующих мощностей энергосистем и оборудования систем внешнего тягового электроснабжения, так как на текущем уровне развития науки и техники отсутствуют доступные технологии накопления электроэнергии, которые могли бы обеспечить питание электротяги в течение сколько-нибудь значительного промежутка времени.

На основе известной схемы исследования систем энергетики с позиций энергетической безопасности [3, 4] предложена схема исследования системы электротяги поездов (рис. 1) с приоритетом повышения эффективности использования электроэнергии при комплексном учете технических характеристик оборудования системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава и особенностей их взаимного влияния.

Согласно этой концепции, разработана методология определения текущего (базового) уровня энергетической эффективности СТЭ и ЭПС в условиях взаимного влияния режимов их работы в границах контролируемых участков железных дорог, что определяет уровень эффективности использования электроэнергии на тягу поездов.

С целью локализации очагов повышенного уровня потерь (небаланса) и удельного расхода электроэнергии на тягу поездов предложены принципы и метод разделения железных дорог на контролируемые участки [5].

Оценка энергетической эффективности для каждого участка выполняется с учетом технических параметров элементов инфраструктуры, характеристик используемого электроподвижного состава, весовых норм и размеров движения поездов и других факторов, оказывающих влияние на эффективность использования электроэнергии на тягу поездов.

Применение методологии позволяет осуществлять переход от усредненных по сети железных дорог значений по полигонам постоянного и переменного тока к динамически определяемым значениям допустимых потерь (небаланса) электроэнергии по любому контролируруемому участку.

В ходе проведения работ по энергетическому обследованию ОАО «Российские железные дороги» был выполнен расчет базового уровня энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава в условиях взаимного влияния режимов их работы в границах 78 контролируемых участков (30 – постоянного и 48 – переменного тока) по сети железных дорог, который показал, что на момент проведения обследования только на четырех участках постоянного тока и 19 участках переменного тока фактические значения небаланса находятся в пределах расчетных значений технологических потерь электроэнергии на тягу поездов (рис. 2).

При этом выявлены аномальные отклонения значений небаланса по участкам переменного тока как в положительную сторону, так и в область отрицательных значений, что противоречит физическим законам, а на постоянном токе уровень небаланса может в несколько раз превышать расчетные значения технологических потерь.

Для оценки эффективности использования электроэнергии на тягу поездов по счетчикам электроподвижного состава разработаны методики оценки энергетической эффективности технологий эксплуатации системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава на контролируемых участках, применение которых позволяет определять потенциал повышения эффективности использования и снижения потерь (небаланса) электроэнергии на тягу поездов как в границах контролируемых участков, так и в границах железных дорог и в целом по сети дорог [6, 7].

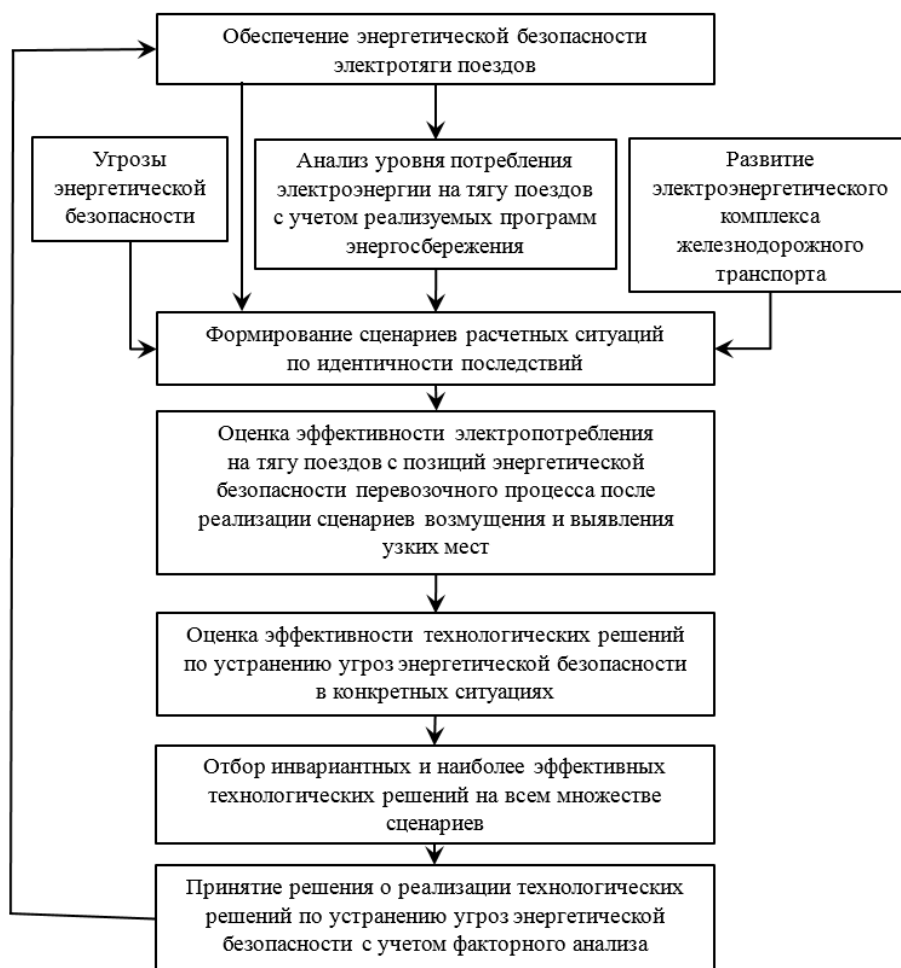
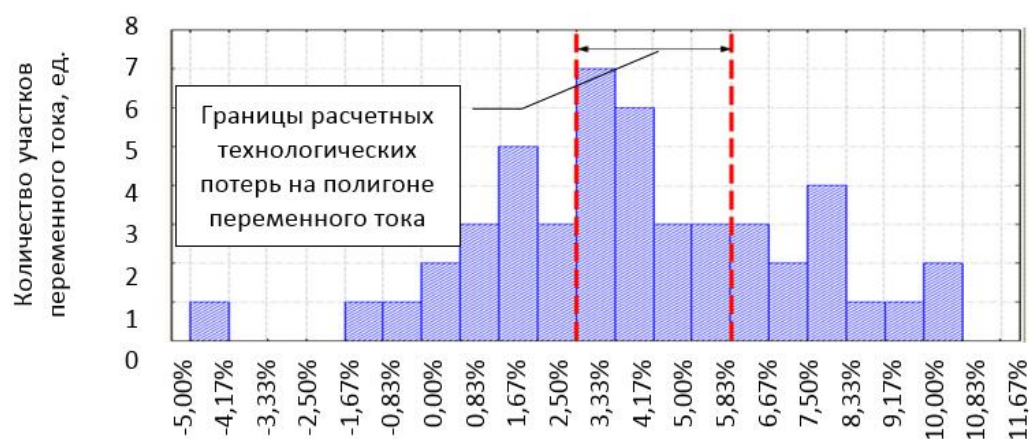


Рис. 1. Схема исследования системы электротяги поездов с позиций энергетической безопасности

Опытное внедрение предложенных методик позволило оценить потенциал энергосбережения в электротяге поездов по сети железных дорог в размере 1 844,3 млн кВт·ч в год и определить, что доля потенциала энергосбережения, мероприятия по реализации которой окупаются в течение шести лет, составляет 3,8 % от годового расхода электроэнергии на тягу поездов или 1 523,3 млн кВт ч (на момент проведения оценки). При этом наиболее эффективными являются технологии эксплуатации, включающие применение рекуперативного торможения и использование энергии рекуперации.

Был проведен ряд натурных и вычислительных экспериментов по определению энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и определения структуры использования энергии рекуперации.

По результатам исследований была разработана и утверждена для использования на сети железных дорог методика оценки эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации. Предложенная методика позволяет выполнять оценку величины полезно использованной энергии рекуперации, наличие которой снижает энергопотребление по тяговым подстанциям. Анализ использования энергии рекуперации показал, что наиболее эффективным вариантом является ее потребление на собственные нужды выработавшей ее подвижной единицы, а наименее эффективным – возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения.



Значения относительного небаланса электроэнергии на тягу поездов

a



Значения относительного небаланса электроэнергии на тягу поездов

б

Рис. 2. Распределение участков железных дорог по уровню небаланса электроэнергии на тягу поездов:
a – полигон переменного тока; *б* – полигон постоянного тока

Разработанная методология позволяет аналитическим путем без затрат на оснащение участков дополнительной измерительной техникой выполнять оценку работы СТЭ, технологии перевозочного процесса и предлагать технологические решения по обоснованной интенсификации применения рекуперативного торможения и повышению энергетической эффективности тяги поездов. Пример результатов апробации оценки эффективности использования энергии рекуперации приведен на рис. 3.

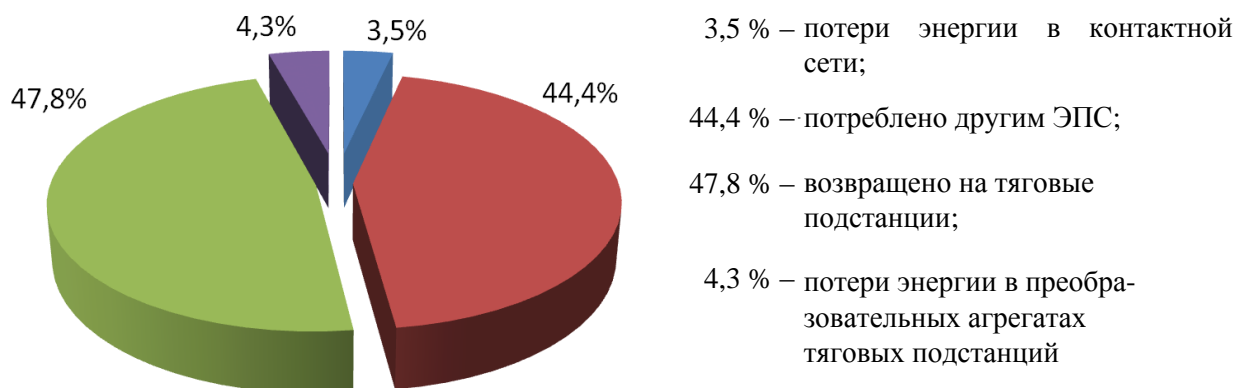


Рис. 3. Баланс выработанной энергии рекуперации на расчетном участке постоянного тока за расчетный период

Кроме того, возможно определение степени влияния использования энергии рекуперации на уровень технологических потерь в СТЭ для участков постоянного и переменного тока (см. табл.).

Анализ полученных зависимостей показал, что на уровень потерь энергии рекуперации в тяговой сети и эффективность использования энергии рекуперации $k_{\text{рек.эфф}}^{\text{КС}}$ на участках постоянного и переменного тока в первую очередь влияют размеры движения поездов, в том числе грузовых, а для участков постоянного тока дополнительно – средняя масса грузовых поездов в более сложном направлении и техническая скорость в грузовом движении.

Ожидаемое снижение потерь электроэнергии на тягу поездов в СТЭ при рекуперативном торможении и использовании энергии рекуперации

	Характеристики участков			
	однопутный		двухпутный	
	постоянного тока	переменного тока	постоянного тока	переменного тока
Снижение потерь, %	10,8	0,5	6,3	2,4

Известно, что наибольшее влияние на небаланс электроэнергии на тягу поездов оказывают такие эксплуатационные факторы, как:

- величина перевозочной работы в структурном подразделении;
- доля перевозочной работы в грузовом движении;
- техническая скорость в грузовом, пассажирском и хозяйственном движении;
- коэффициент участковой скорости в грузовом, пассажирском и хозяйственном движении;
- масса грузового, пассажирского и хозяйственного поезда;
- нагрузка на ось грузового вагона в грузовом и хозяйственном движении;
- доля порожнего пробега грузовых вагонов;
- время простоя локомотивов в рабочем состоянии в ожидании работы;
- пробег локомотивов резервом;
- усредненный индикатор энергоэффективности электровоза;
- температура атмосферного воздуха.

Анализ различных зависимостей показателей П1, П2 и П3 (соответственно абсолютный небаланс, относительный небаланс и отношение величины небаланса к величине перевозочной работы) и указанных факторов выявил, что в большинстве случаев максимальный коэффициент корреляции у

зависимостей показателя ПЗ. Именно его целесообразно использовать для построения регрессионных зависимостей небаланса от влияющих факторов.

Определены коэффициенты влияния эксплуатационных факторов на уровень небаланса.

Применение методики позволяет повышать точность нормирования и прогнозирования электропотребления на тягу поездов и, как следствие, качество бюджетирования, что обеспечивает снижение соответствующих затрат на электроэнергию.

Для управления рисками в области энергетической безопасности предложена концепция системы мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса на контролируемых участках железных дорог постоянного и переменного тока, применение которой позволяет обеспечивать контроль основных показателей эффективности использования электроэнергии на тягу поездов и разработку технологических решений для их улучшения [8, 9].

С целью реализации системы мониторинга разработана и принята к использованию на сети железных дорог технология учета электроэнергии на электроподвижном составе с помощью информационно-измерительных комплексов, позволяющая в режиме реального времени определять местоположение электроподвижного состава в границах учетных зон, выполнять синхронизацию с показаниями приборов учета электроэнергии. Предложены и запатентованы способы контроля расхода электроэнергии электроподвижным составом в границах произвольной зоны учета и уровня технологических потерь электроэнергии в тяговой сети и на тяговых подстанциях постоянного тока.

В соответствии с принятой концепцией на экспериментальном участке Шаля – Подволошная Свердловской железной дороги, на вводах 3,3 кВ и фидерах контактной сети тяговых подстанций:

– отработана технология обработки показаний измерительных систем, установленных на фидерах контактной сети;

– определен уровень потерь электроэнергии в тяговой сети, выявлены перетоки мощности между смежными тяговыми подстанциями, выполнена оценка потенциала снижения расхода электроэнергии на тягу поездов за счет оптимизации режимов ведения и применения автоведения поездов;

– разработаны рекомендации по повышению эффективности технологических режимов оборудования системы тягового электроснабжения, в том числе за счет выравнивания напряжения на шинах смежных тяговых подстанций, устранения перетоков мощности по контактной сети и неравномерности загрузки выпрямительных преобразователей.

Для реализации концепции системы мониторинга энергетической эффективности перевозочного процесса разработаны и приняты к использованию на сети железных дорог технические требования к информационно-измерительным комплексам учета электроэнергии на электроподвижном составе и технологические решения по их применению [10].

Прогнозирование состояния энергетической безопасности выполняется на основе разработанного метода прогнозирования потребления электроэнергии на тягу поездов в границах работы локомотивных бригад депо с использованием анализа временных рядов. Эффективность метода определяется получением оценки потенциала использования энергосберегающих технологий выполнения перевозочной работы с учетом возможностей системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны теоретические положения, на основе которых получены новые научно обоснованные технические и технологические решения по снижению энергетических потерь, повышению энергообеспечения, эффективности и устойчивости электротяги поездов за счет совершенствования условий взаимодействия и технологий эксплуатации системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава, имеющие важное хозяйственное значение в области железнодорожных перевозок при реализации правительственной программы «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» и Стратегии развития ОАО «РЖД» на период до 2030 года.

Применение полученных научных положений и методов позволяет определять исходные требования для разработки технических условий на проектирование систем тягового электроснабжения, обеспечивающих энергоэффективное и устойчивое электропитание тяги поездов, выполнять оценку энергетической эффективности и корректировку технических и технологических решений по энергосберегающей эксплуатации оборудования тяговых подстанций и электроподвижного состава.

Список литературы

1 Energy Dictionary / World Energy Council. – JOUVE SI. ; Paris (France), 1992. – 652 p. – ISBN 2-909832-00-7.

2 Указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации» / Собрание законодательства РФ от 20 мая 2019 г. № 20 ст. 2421. // Base.garant : [сайт]. – URL: <https://base.garant.ru/72240884> (дата обращения: 28.07.2024).

3 Энергетическая безопасность России / Н. И. Воропай, С. М. Сендеров, Н. И. Пяткова, Г. Б. Славин. – Новосибирск : Новосибирский филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Академический научно-издательский и книгораспространительский центр "Наука"», 1998. – 302 с. – ISBN 5-02-031340-8.

4 **Рабчук, В. И.** Энергетическая безопасность России : проблемы и пути решения / В. И. Рабчук, С. М. Сендеров, Г. Б. Славин ; ответственные редакторы Н. И. Воропай, М. Б. Чельцов ; Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2011. – 197 с. – ISBN 978-5-7692-1163-8.

5 **Никифоров, М. М.** Энергетическое обследование системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава / М. М. Никифоров // Инновационное развитие железнодорожного транспорта России : материалы всероссийской научно-практической конференции, Омск, 15 ноября 2012 года / Министерство транспорта РФ, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, ОАО «Российские железные дороги», ОмГУПС. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2012. – С. 113–119. – EDN VSGIID.

6 **Черемисин, В. Т.** Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы VI научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки, Омск, 08 февраля 2012 года / Ответственный редактор В. Т. Черемисин. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2012. – С. 9–15. – EDN RRFTRJ.

References

1 Energy Dictionary / World Energy Council. – JOUVE SI. ; Paris (France), 1992. – 652 p. – ISBN 2-909832-00-7.

2 Decree of the President of the Russian Federation of May 13, 2019 No. 216 "On Approval of the Doctrine of Energy Security of the Russian Federation" / Collection of Legislation of the Russian Federation dated May 20, 2019 No. 20, Article 2421. // Base.garant : [website]. – URL: <https://base.garant.ru/72240884> (date of access: 07/28/2024).

3 Energy security of Russia / N. I. Voropai, S. M. Senderov, N. I. Pyatkova, G. B. Slavin. – Novosibirsk : Novosibirsk branch of the Federal State Unitary Enterprise "Academic Scientific Publishing and Book Distribution Center "Nauka", 1998. – 302 p. – ISBN 5-02-031340-8.

4 **Rabchuk, V. I.** Energy security of Russia : problems and solutions / V. I. Rabchuk, S. M. Senderov, G. B. Slavin ; executive editors N. I. Voropai, M. B. Cheltsov ; Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, L. A. Melentyev Institute of Energy Systems. Novosibirsk : Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011. – 197 p. – ISBN 978-5-7692-1163-8.

5 **Nikiforov, M. M.** Energy inspection of the traction power supply system and electric rolling stock / M. M. Nikiforov // Innovative development of Russian railway transport : materials of the All-Russian scientific and practical conference, Omsk, November 15, 2012 / Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal Agency for Railway Transport, JSC "Russian Railways", OmGUPS. – Omsk : Omsk State Transport University, 2012. – P. 113–119. – EDN VSGIID.

6 **Cheremisin, V. T.** Improving the energy efficiency of the traction power supply system and electric rolling stock / V. T. Cheremisin, M. M. Nikiforov // Innovative projects and new technologies in education, industry and transport : materials of the VI scientific and practical conference dedicated to the Day of Russian Science, Omsk, February 08, 2012 / Responsible editor V. T. Cheremisin. – Omsk : Omsk State Transport University, 2012. – P. 9–15. – EDN RRFTRJ.

7 Черемисин, В. Т. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба. – 2013. – № 2 (14). – С. 75–84. – EDN QCGDRF.

8 Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков, М. М. Никифоров // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45–49. – EDN TKIRKF.

9 Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электротяги при внедрении мониторинга электроэнергии на фидерах контактной сети / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Транспорт Урала. – 2015. – № 2 (45). – С. 67–70. – EDN TXOYMH.

10 Черемисин, В. Т. Совершенствование системы учета электроэнергии на электроподвижном составе для обеспечения мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2018 года. Том 2. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 320–323. – EDN XZKWHJ.

7 Cheremisin, V. T. Evaluation of the potential to increase the energy efficiency of the traction power supply system / V. T. Cheremisin, M. M. Nikiforov // The proceedings of Transsib. – 2013. – No. 2 (14). – P. 75–84. – EDN QCGDRF.

8 Stages of implementation of an automated system for monitoring the energy efficiency of the transportation process / V. T. Cheremisin, S. Yu. Ushakov, D. V. Pashkov, M. M. Nikiforov // Rail transport. – 2015. – No. 3. – P. 45–49. – EDN TKIRKF.

9 Cheremisin, V. T. Improving the energy efficiency of electric traction when implementing electricity monitoring on contact network feeders / V. T. Cheremisin, A. L. Kashtanov, M. M. Nikiforov // Transport of the Urals. – 2015. – No. 2 (45). – P. 67–70. – EDN TXOYMH.

10 Cheremisin, V. T. Improvement of the electricity metering system on electric motive power to ensure monitoring of energy efficiency of the transportation process / V. T. Cheremisin, M. M. Nikiforov, Yu. V. Plotnikov // Actual problems and prospects of development of transport, industry and economy of Russia : Collection of scientific papers, Rostov-on-Don, March 01–02, 2018. Volume 2. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2018. – P. 320–323. – EDN XZKWHJ.

M. M. Nikiforov, S. G. Shantarenko

ENSURING ENERGY SECURITY OF ELECTRIC TRAINS ON RAILWAY TRANSPORT

Abstract. The article presents the results of the development of new scientifically based technical and technological solutions to reduce energy losses, increase energy supply, efficiency and stability of electric train traction by improving the conditions of interaction and technologies of operation of the traction power supply system and electric rolling stock to ensure the energy security of the transportation process on railway transport.

The tasks of monitoring, assessing and forecasting the state of energy security have been solved; determining the resources necessary to prevent threats to energy security, which is the basis of the risk management system in the field of energy security of electric trains.

The application of the obtained scientific provisions and methods makes it possible to determine the initial requirements for the development of technical specifications for the design of traction power supply systems that provide energy-efficient and sustainable power supply to train traction, to evaluate energy efficiency and adjust technical and technological solutions for energy-saving operation of traction substation equipment and electric rolling stock.

Keywords: energy security, train traction, traction power supply system, electric motive power, loss (imbalance) of electricity, energy recovery, energy saving, energy efficiency of train traction.

For citation: Nikiforov, M. M. Ensuring energy security of electric trains on railway transport / M. M. Nikiforov, S. G. Shantarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 130–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_130.

Сведения об авторах**Никифоров Михаил Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кандидат технических наук,
директор научно-исследовательского
института энергосбережения на
железнодорожном транспорте,
e-mail: nikiforovmm@mail.ru

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Технологии транспортного
машиностроения и ремонта подвижного
состава»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: nauka@omgups.ru

Information about the authors**Nikiforov Mikhail Mikhailovich**

Omsk State Transport University (OSTU),
Candidate of Engineering Sciences,
Director of the Research Institute for Energy Saving
in Railway Transport,
e-mail: nikiforovmm@mail.ru

Shantarenko Sergey Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Technologies of Transport
Engineering and Rolling Stock Repair»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: nauka@omgups.ru

В. А. Осипов

ИНТЕГРАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ С СИСТЕМОЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования волоконно-оптических линий связи, прокладываемых на опорах контактной сети в качестве элементов системы тягового электроснабжения. Предложен вариант отказа от использования диэлектрических кабелей типа ОКСН, применяемых в настоящее время, и переход на кабели, выполненные из проводящего материала, в частности на кабели ОКГТ. Приведены примеры использования кабелей типа ОКГТ в составе существующих тяговых сетей для достижения целей повышения энергоэффективности перевозочного процесса. В их числе пример организации электрически скомпенсированных тяговых сетей без прокладки дополнительных проводников, повышение надежности системы группового заземления опор, а также организация грозозащитной контактной сети участка железной дороги.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, энергоэффективность, тяговая сеть, групповое заземление опор, грозозащита.

Для цитирования: Осипов, В. А. Интеграция волоконно-оптических линий связи с системой тягового электроснабжения как способ повышения энергетической эффективности железных дорог // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 139–147. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_139.

Введение

Проектирование и сооружение первых волоконно-оптических линий железнодорожного транспорта осуществлялось самонесущим волоконно-оптическим кабелем, имеющим полностью диэлектрическую структуру. На стадии проектирования и строительства таких линий считалось, что влияние электрического поля контактной сети и линий ДПР на волоконно-оптический кабель (ВОК) будет отсутствовать, следовательно, принимать во внимание электрическое влияние на ВОК нет необходимости. В реальности ситуация оказалась иной, и на сети электрифицированных железных дорог периодически стали возникать места локального пережога волоконно-оптического кабеля. Исследованием процессов разрушения волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах контактной сети, занимались многие научные коллективы, в том числе коллектив Ростовского государственного университета путей сообщения [1–3]. В результате проводимых исследований было установлено, что авариям предшествовала фаза разрушения верхней полиэтиленовой оболочки, после чего наступал обрыв кабеля [4]. Применение на сети дорог волоконно-оптических кабелей с трекингостойкой оболочкой не дает существенного эффекта, и на сегодняшний день с учетом данных статистики аварий на Северо-Кавказской железной дороге можно утверждать, что за последние 20 лет эксплуатации волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), подвешиваемых на опорах железных дорог переменного тока, мало что изменилось: так, в 2023 году на Северо-Кавказской железной дороге произошло 98 обрывов, а в 2022 году – 102 обрыва волоконно-оптического кабеля.

Основная часть

Исследования, проводимые автором, показали, что изменения, происходящие в кевларе под действием электрического поля контактной сети, приводят к ускоренной деградации кевларовой нити, что в дальнейшем приводит к обрывам кабеля. В качестве альтернативы кабелям ОКСН (оптический кабель самонесущий) предлагается использовать кабели типа ОКГТ (оптический кабель, смонтированный в грозозащитный трос). На высоковольтных линиях электропередачи в России и в ряде зарубежных стран уже много лет успешно эксплуатируется оптоволоконный кабель, смонтированный в грозозащитный трос. Такой кабель рассчитан на работу в условиях мощных электромагнитных полей, размещается на траверсе в верхней точке опоры линии электропередачи и сконструирован с учетом возможности сохранения работоспособности при прямом ударе молнии тело кабеля. Очевидным достоинством такого кабеля является его защищенность от влияния электромагнитных полей в зоне прокладки линии связи. Кабель типа ОКГТ в простейшем случае подвешивается аналогично кабелю ОКСН, за исключением того, что подвеска кабеля осуществляется на изоляторах.

Основной причиной, препятствующей использованию кабеля ОКГТ, являлась цена: на момент начала строительства первых ВОЛС стоимость 1 км кабеля ОКСН была почти в 10 раз ниже стоимости 1 км кабеля ОКГТ. Однако исследования предложений рынка на сегодняшний день показывает экономическую целесообразность отказа от кабелей ОКСН в пользу кабелей ОКГТ, ввиду того что стоимость ОКСН сильно возросла.

Рассмотрим вначале задачу интеграции ОКГТ в систему тягового электроснабжения в качестве экранирующего проводника. Известно, что для системы тягового электроснабжения переменного тока снижение потерь энергии может быть достигнуто в том числе за счет использования электрически скомпенсированных тяговых сетей, обладающих пониженным полным сопротивлением, таких как тяговые сети с ЭУП, тяговая сеть с ЭП и некоторые другие (рис. 1). На рис. 1 НТ, КП – несущий трос и контактный провод соответственно, УП, ЭП – усиливающий и экранирующий проводники, ТГЗ – трос группового заземления.

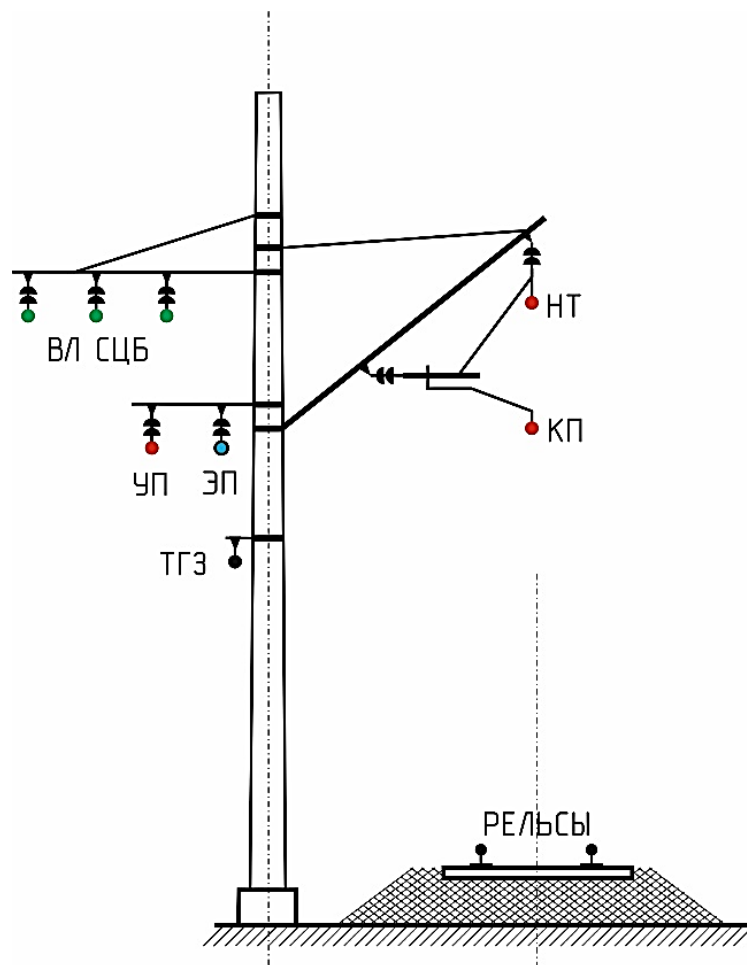


Рис. 1. Пример расположения питающих и заземленных проводов на опоре

Такие тяговые сети обладают улучшенными энергетическими характеристиками и позволяют повысить пропускную способность участка железной дороги, однако их внедрение требует подвески дополнительных проводников вдоль всей межподстанционной зоны. Эффективность, достигаемая за счет снижения удельного сопротивления тяговой сети, в значительной мере зависит от применяемой конструкции многопроводных тяговых сетей, а для сетей с экранирующим и усиливающим проводом либо сетей с экранирующим проводом зависит от типов применяемой контактной подвески, марки рельсов и типа экранирующего проводника. Выпускаемые на сегодняшний день типы кабелей ОКГТ имеют очень широкую номенклатуру как по числу оптических волокон, так и по сечению алюминиевой и стальной части кабеля. Например, кабель ОКГТс-1-24(G652)-15,8/69, выпускаемый заводом «Саранскабель-оптика» и применяемый на ЛЭП 110 кВ и выше, имеет номинальный диаметр 15,8 мм и рассчитан на кратковременное протекание токов до 12,4 кА в интервале не более 1 с. Такой кабель рассчитан на рабочий диапазон температур от -60 до $+80$ °С, и имеет активное сопротивление посто-

янному току, равное 0,28 Ом/км, масса такого кабеля составляет 535 кг/км. В системе с экранированным усиливающим проводником в качестве экранирующего проводника используется трос типа А185, его номинальный диаметр 17,5 мм. Такой трос рассчитан на рабочий диапазон температур от –60 до +90 °С и имеет активное сопротивление постоянному току, равное 0,1574 Ом/км, масса такого кабеля составляет 502 кг/км. Для оценки эффективности было выполнено моделирование работы однопутного участка Зимовники – Тихорецкая в программном комплексе «Кортес». Длина участка составляет 280 км; рассматриваемый участок включает в себя 5 тяговых подстанций и 4 поста секционирования, рельсы Р75.

Были рассмотрены три модификации тяговой сети: стандартная – М120+МФ100, с экранирующим приводом (ЭП) – М120+МФ100+ОКГТ, сеть с экранирующим и усиливающим проводом (ЭУП) – М120+МФ100+уА185+ОКГТ. Внедрение решения, когда ОКГТ используется в качестве экранирующего проводника (ЭП), согласно результатам расчета, позволит увеличить напряжение на лимитирующем перегоне на 4 % (0,9 кВ), а при использовании ОКГТ в составе тяговой сети с ЭУП – на 10 % (2,1 кВ). Важно также отметить, что указанная мера позволяет снизить потери напряжения на участке на 7,5 % (315 кВт·ч) при применении ОКГТ в качестве ЭП, а при применении в составе ТС ЭУП на 17,7 % (732 кВт·ч). Очевидно, что применение кабеля ОКГТ в составе тяговой сети позволит повысить энергоэффективность участка электрических железных дорог переменного тока и при этом существенно снизить затраты при строительстве. При этом кабель ОКГТ может использоваться и как отдельный экранирующий проводник, и как экранирующий проводник в составе системы ЭУП.

Использование проводящей оболочки ВОЛС, выполняемой кабелем ОКГТ, не ограничивается интеграцией кабеля в тяговую сеть. Не менее актуальной задачей для электрифицированной железной дороги является обеспечение условий для надежной работы комплектов релейных защит при возникновении кратких замыканий на опорах контактной сети. Важность указанной задачи определяется двумя причинами. Во-первых, при замыкании питающих проводников на тело опоры контактной сети возникает опасность поражения электрическим током людей, прикасающихся к данной опоре, поэтому аварийную ситуацию необходимо как можно быстрее купировать. Проблемой в данном случае является весьма малое значение тока замыкания на тело опоры по сравнению с расчётными значениями токов короткого замыкания, попадающих вследствие этого в зону нечувствительности релейной защиты. Нечувствительность релейной защиты к такого рода авариям становится причиной второй проблемы, возникающей из-за длительного протекания неотключённого тока замыкания через арматуру опоры в землю и приводящей в перспективе к разрушению опоры и непригодности ее к дальнейшей эксплуатации.

Одним из способов решения задачи локализации короткого замыкания на опорах контактной сети на сегодняшний день является обеспечение надежного заземления арматуры опоры контактной сети с использованием системы группового заземления. В соответствии с ЦЭ-191 организация группового заземления опор контактной сети выполняется с использованием сталеалюминевых либо биметаллических проводов, объединяющих несколько опор в одну группу. Однако при своей простоте система группового заземления опор имеет весьма существенный недостаток. Объясняется он необходимостью организации заземляющего спуска, соединяющего трос группового заземления с рельсовой цепью. Такое решение нарушает технологию ремонта пути с использованием путевых машин, так как требует отсоединения и повторного присоединения заземляющего проводника к рельсу. На этапе выполнения такого рода работ заземляющий спуск зачастую оказывается не подключенным к рельсовой цепи, что делает систему заземления группы опор неработоспособной. Кроме того, при возникновении аварийной ситуации на одной из опор данной группы опасный потенциал будет вынесен на все опоры группы. Причин, из-за которых может быть нарушена целостность заземляющего спуска, несколько: к ним следует отнести коррозию, вандализм, халатность при выполнении путевых работ и др.

Для повышения надежности работы системы группового заземления предлагается использовать металлическую оболочку кабеля ОКГТ в качестве резервного проводника тока короткого замыкания. Известны решения [5, 6], в которых экранирующий провод используется в качестве провода группового заземления, однако в данном случае предлагается рассмотреть не замену существующей системы заземления опор, а ее усиление за счет соединения с металлической оболочкой ОКГТ. Для достижения поставленной цели в месте присоединения заземляющего спуска к существующему тросу группового заземления (ТГЗ) монтируется дополнительный проводник, соединяющий ТГЗ с ОКГТ (рис. 2). Непосредственное объединение отдельных участков ТГЗ через проводящую оболочку ОКГТ, очевидно, вызовет сбой в работе системы автоблокировки участка, поэтому соединение необходимо выполнять через изолирующий искровой промежуток.

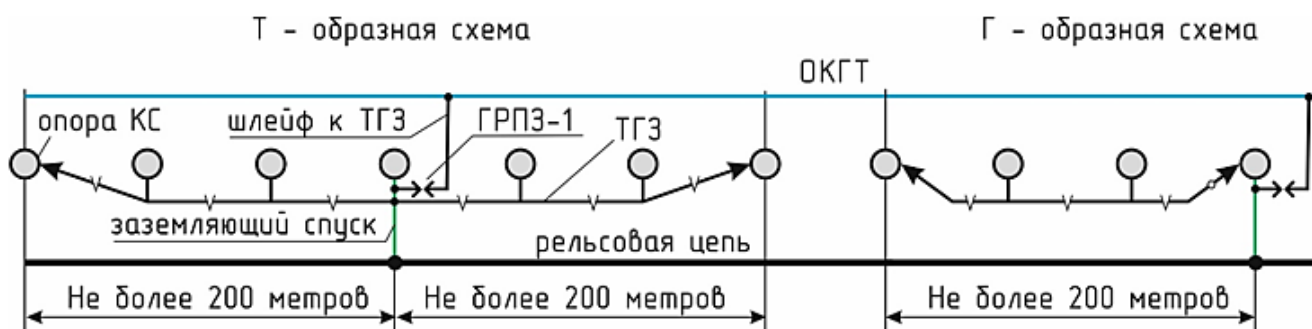


Рис. 2. Усиленная система группового заземления опор контактной сети переменного тока

Ввиду того что ОКГТ располагается на опоре на высоте порядка 7 м, замена искровых промежутков в процессе эксплуатации представляет определённые трудности, поэтому использование приборов многократного действия ГРПЗ-1 и им подобных будет более целесообразно, чем использование искровых промежутков типа ИПМ-62.

Работать усиленная система группового заземления будет следующим образом. В момент возникновения короткого замыкания на группе опор соединённый ТГЗ потенциал в точке присоединения дополнительного заземляющего проводника будет определяться падением напряжения на элементах системы заземления ТГЗ – заземляющем проводнике, рельсовой цепи, обмотках дроссель-трансформатора. Очевидно, что напряжение, прикладываемое в таком режиме к прибору ГРПЗ-1, будет недостаточным для его перекрытия, и система будет работать по традиционной схеме. В случае отсутствия заземляющего спуска ток замыкания на начальном этапе будет обусловлен токами, стекающими с фундаментов группы опор, а ввиду сравнительно малой величины этого тока напряжение, прикладываемое к прибору ГРПЗ-1, будет достаточным для его срабатывания, и ТГЗ будет электрически соединён с ОКГТ, который, в свою очередь, соединяется с нулевыми точками дроссель-трансформаторов через каждые 3,5–7 км. Очевидно, что сопротивление петли короткого замыкания в таком режиме вырастет на некоторую величину, определяемую сопротивлением ОКГТ, однако ТГЗ сохранит электрическую связь с цепями заземления и работа релейных защит будет обеспечена. Такое описание развития событий будет правильным для участков, на которых отсутствуют низкоомные опоры, с сопротивлением менее 100 Ом, так как для них подключение заземляющего спуска выполняется непосредственно к рельсу без использования искровых промежутков.

Для участков, на которых установлены опоры с сопротивлением ниже 100 Ом, обязательно использование искровых промежутков (ИП), поэтому в момент возникновения аварии вероятность пробоя ИП будет зависеть от его вольт-секундной характеристики. Для обеспечения надежного срабатывания ИП штатного заземляющего спуска его вольт-секундная характеристика должна проходить выше аналогичной характеристики ГРПЗ-1 – прибора, устанавливаемого в цепь соединения ТГЗ-ОКГТ. При выполнении данного условия резервная цепь протекания тока короткого замыкания в штатном режиме не будет задействована.

Для практического применения описанного предложения кроме задачи подбора искровых промежутков необходимо определить возможность протекания по ОКГТ токов короткого замыкания, которые возникают при авариях в контактной сети. Учитывая, что по ОКГТ будет протекать ток короткого замыкания в обе стороны от места присоединения к ТГЗ и ориентируясь на величину допустимого значения теплового импульса, указанного в паспорте к ОКГТ, можно сделать вывод о возможности либо невозможности такого технического решения. Например, для описанного выше оптоволоконного кабеля типа ОКГТс-1-24(G652)-15,8/69 допустимое значение теплового импульса составляет 153,76 кА²·с, что с учетом времени срабатывания релейных защит и токов короткого замыкания в контактной сети удовлетворяет требованиям к термической стойкости ОКГТ.

Отказ от применения кабеля ОКСН при сооружении оптоволоконных линий связи железной дороги позволяет кроме вышеописанных технических решений реализовать задачу защиты участка железной дороги от прямых ударов молнии. В качестве грозозащитного троса предлагается использовать кабель ОКГТ, который завешивается на опорах. В этом случае кабель ОКГТ будет использоваться по своему прямому назначению – для передачи информации и защиты линии. Рассмотрим эффективность применения ОКГТ при условии, что он будет завешен в верхней точке опоры контактной сети с использованием траверсы, например, стойки усиливающего провода (рис. 3). Такое решение необходимо

для выравнивания зон молниезащиты и их согласования с трассами прокладки питающих проводов контактной сети, ДПП и ВЛ СЦБ.

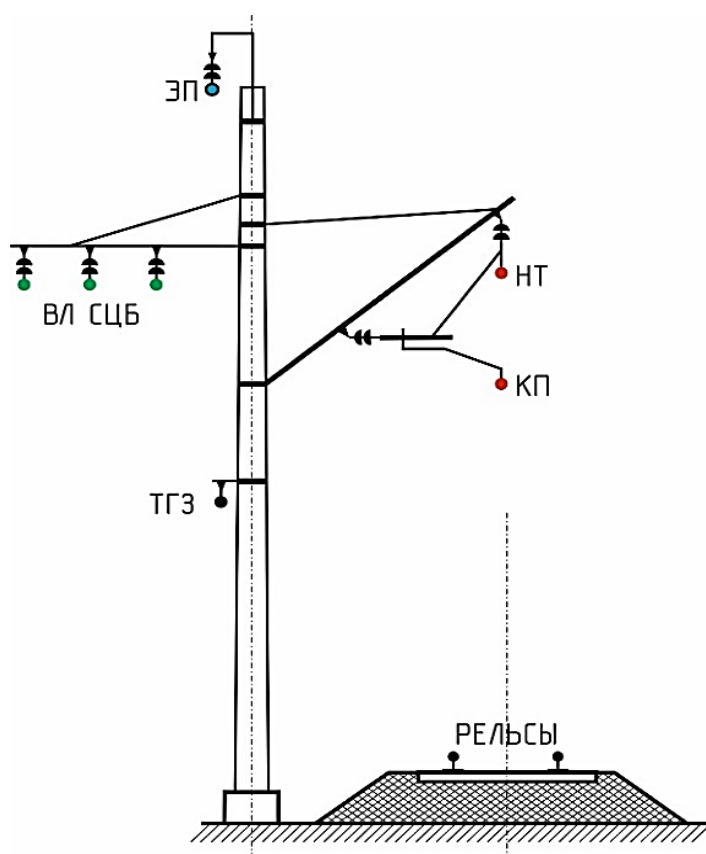


Рис. 3. Расположение ОКГТ на опоре контактной сети переменного тока

Для анализа эффективности такого решения используем соотношение [7, 8]:

$$P = \exp \left[\frac{1}{D} \cdot \left(\frac{0,55}{\Delta h} \sqrt{\alpha \cdot h_m \cdot \Delta S} - \frac{9}{D} \right) \right];$$

$$D = 1 + U_{НОМ} \frac{h_m}{\Delta h} \cdot \left[\frac{117 \cdot U_{НОМ}^2}{\Delta h \cdot \Delta S \cdot \ln \left(\frac{2h_{np}}{r_{np}} \right)} \right]^3,$$

где P – вероятность поражения молнией провода ЛЭП;
 $U_{НОМ}$ – напряжение высоковольтной линии (ВЛ), МВ;
 α – угол защиты троса, градусы;
 h_m – высота подвеса ТГЗ над землей, м;
 h_{np} – высота подвеса фазного провода над землей, м;
 Δh – разница высот подвеса фазного провода и ТГЗ, м;
 ΔS – расстояние по горизонтали между проводом и ТГЗ, м.

Для анализа примем, что все три фазы ВЛ СЦБ завешены, как показано на рис. 3, рядом, расстояние от правой фазы до опоры составляет 1,2 м, расстояние между фазами 1 м, высота подвеса над землей 7 м. Высоту подвеса ОКГТ примем равной 10 м. Результат расчета вероятности поражения молнией фазных проводов ВЛ СЦБ показан на рис. 4 (кривая 1). Очевидно, что для проводников правой и средней фаз вероятность прорыва молнии не превышает 0,02, однако для крайней левой фазы это значение достигает 0,25. Однозначно можно говорить о том, что такое решение не дает защиту от прорыва молнии с вероятностями менее 0,01 и 0,001, как это предусмотрено действующими руководящими ука-

заниями по расчету зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов, однако обеспечивает снижение в четыре раза вероятности прорыва молнии для наиболее подверженной поражению фазы. Следует отметить, что при снижении высоты подвеса ВЛ СЦБ на 0,5 м и сохранении прочих габаритов вероятность прорыва молнии падает почти в четыре раза (рис. 4., кривая 2).

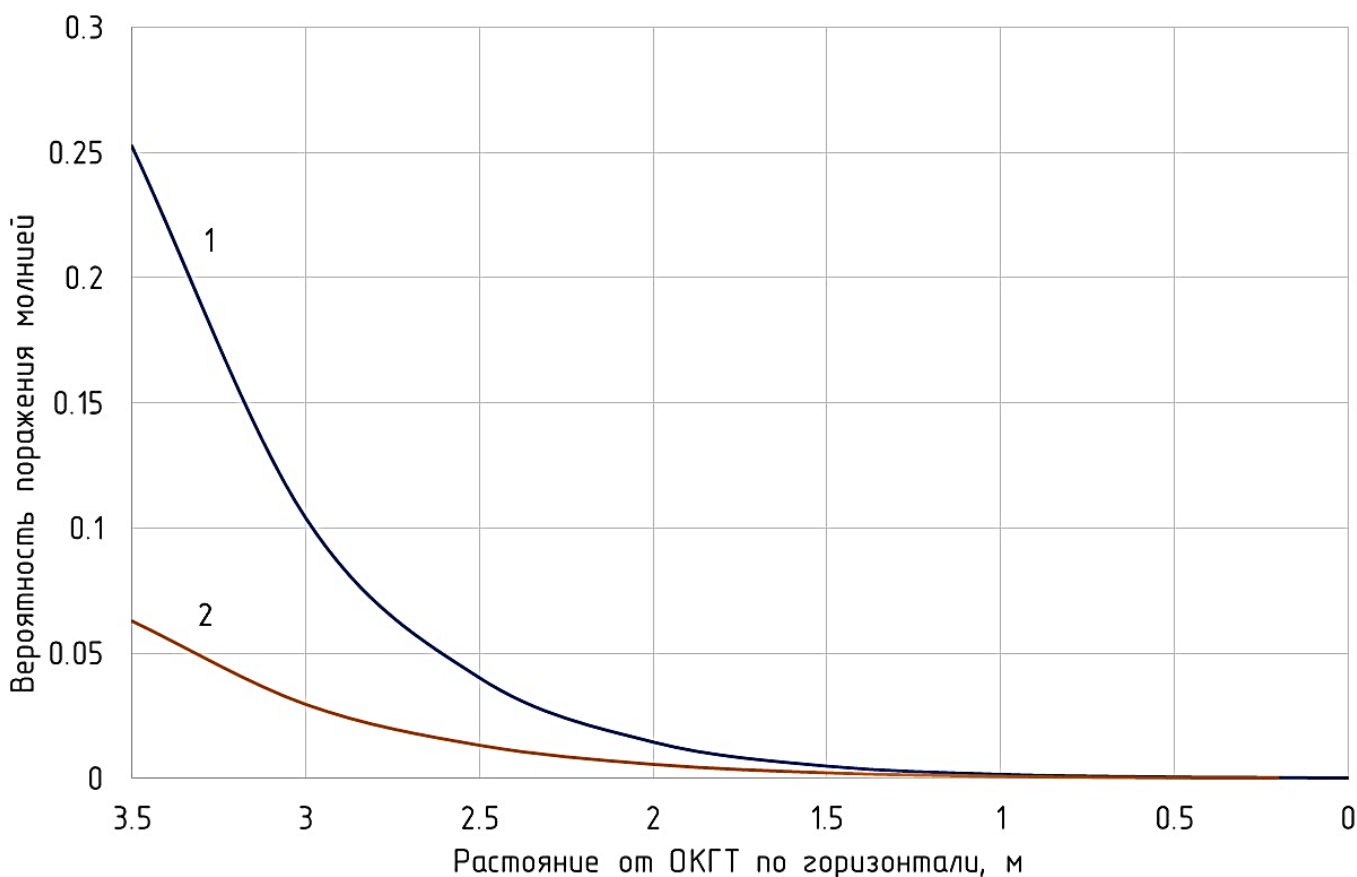


Рис. 4. Вероятность прорыва молнии на провода ВЛ 10 кВ СЦБ

При необходимости реализации на участке тяговой сети с экранированным усиливающим проводом следует рассмотреть вопрос подвески усиливающего и экранирующего проводников на Т-образной траверсе в верхней точке опоры. Причем усиливающий проводник должен находиться со стороны пути, а экранирующий – с стороны поля. Такой способ крепления усиливающих проводников на сегодняшний день применяется на электрифицированных железных дорогах.

Выводы

Следует отметить положительные стороны предложенного комплексного подхода к решению ряда существующих проблем на участках железной дороги с тягой переменного тока. Очевидна экономия финансовых средств и времени работников ЭЧ ввиду исключения работ по ликвидации обрывов ВОЛС, вызванных электротермической деградацией. Длительный опыт эксплуатации ОКГТ на линиях электропередачи в качестве линий связи, находящихся внутри грозозащитного троса, позволяет говорить о весьма слабой подверженности кабеля типа ОКГТ воздействию электрического и магнитного полей, нечувствительности к влиянию атмосферных явлений и прочих негативных факторов. Такой кабель показал высокую надежность и в отличие от кабелей ОКСН не нуждается в периодическом контроле оболочки. Самый главный недостаток такого кабеля – цена, значительно превосходящая стоимость кабеля ОКСН. Комплексный подход к решению задач снижения потерь энергии в тяговой сети, повышения уровня напряжения на лимитирующем перегоне, увеличения грузооборота на участках железной дороги, повышения чувствительности релейной защиты, обеспечения защиты опор контактной сети и людей, организации защиты от прямых ударов молнии в питающие линии устройств СЦБ позволит рассмотреть переход к использованию кабеля типа ОКГТ взамен кабелей ОКСН как экономически оправданное решение.

Список литературы

- 1 Электротермическая деградация оптического кабеля на участках железных дорог переменного тока / Ю. И. Филиппов, Э. Е. Асс, Л. Е. Попов [и др.] // *Lightwave Russian Edition*. – 2006. – № 3. – С. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 **Гороховский, Е. В.** Условия электропроводности самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные / Е. В. Гороховский // *Инженерный вестник Дона*. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (дата обращения: 18.09.2024).
- 3 Электротермическая деградация оптического кабеля / Ю. И. Филиппов, Э. Е. Асс, Л. Е. Попов [и др.] // *Фотон-экспресс*. – 2006. – № 7. – С. 37–39. – ISSN 2308-6920.
- 4 Оплавление диэлектрического оптического кабеля, подвешенного на железнодорожных опорах под действием электротермической деградации / И. Н. Чернов, В. И. Муратов, С. М. Куценко, С. А. Зеленов // *Lightwave Russian Edition*. – 2007. – № 2. – С. 34–35.
- 5 **Осипова, А. И.** Расчет токов короткого замыкания сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // *Инженерный вестник Дона*. – 2023. – № 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (дата обращения: 18.09.2024).
- 6 **Лысенко, В. Г.** Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина, Н. А. Попова // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения* – 2020. – № 1. – С. 145–152. – EDN VRRZQJ.
- 7 *Техника высоких напряжений : учебник / И. М. Богатенков, Ю. Н. Бочаров, Н. И. Гумерова [и др.] ; под общей редакцией Г. С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. – 608 с. – ISBN 5-283-04757-1.*
- 8 *Электротехнический справочник в 4 томах. – 9-е издание. – Москва : МЭИ, 2000. – 964 с.*
- 9 Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения / В. А. Осипов, Г. Е. Соловьев, Е. В. Гороховский, А. А. Капкаев // *Инженерный вестник Дона*. – 2013. – № 1 – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (дата обращения: 18.09.2024).
- 10 **Микаэлян, Е. Ю.** Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэлян, В. Н. Черных // *Инженерный вестник Дона*. – 2019. – № 2.

References

- 1 Electrothermal degradation of optical cable on sections of alternating current railways / Yu. I. Filippov, E. E. Ass, L. E. Popov [et al.] // *Lightwave Russian Edition*, 2006. – No. 3. – P. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 **Gorokhovskiy, E. V.** Conditions of electrical conductivity of self-supporting fiber-optic cable. Experimental data / E. V. Gorokhovskiy // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2013. – No. 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (date of access 09/18/2024).
- 3 Electrothermal degradation of optical cable / Yu. I. Filippov, E. E. Ass, L. E. Popov [et al.] // *Foton-ekspress*. – 2006. – No. 7. – P. 37–39. – ISSN 2308-6920.
- 4 Melting of a dielectric optical cable suspended on railway supports under the influence of electrothermal degradation. / I. N. Chernov, V. I. Muratov, S. M. Kutsenko, S. A. Zelenev // *Lightwave Russian Edition*. – 2007. – No. 2. – P. 34–35.
- 5 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of a DC network using a two-level system of group grounding of supports / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2023. – No. 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n6y2023/8489 (date of access 09/18/2024).
- 6 **Lysenko, V. G.** Determination of the boundaries of a traction network section with a stable short circuit / V. G. Lysenko, O. V. Kubkina, N. A. Popova // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. – 2020. – No. 1. – P. 145–152. – EDN VRRZQJ.
- 7 *High Voltage Technique : textbook / I. M. Bogatenkov, Yu. N. Bocharov, N. I. Gumerova [et al.] ; under the general editorship of G. S. Kuchinsky. – St. Petersburg : Energoatomizdat. St. Petersburg Branch, 2003. – 608 p. – ISBN 5-283-04757-1.*
- 8 *Electrical engineering handbook in 4 volumes, 9th edition. MAY Publishing House, Moscow, 2000. – 964 p.*
- 9 Problems of electrothermal degradation of fiber-optic communication lines and promising directions for their solution / V. A. Osipov, G. E. Soloviev, E. V. Gorokhovskiy, A. A. Kapkaev // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2013. – No. 1 – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (date of access 09/18/2024).
- 10 **Mikaelyan, E. Yu.** Modeling of electromagnetic fields of an alternating current railway section / E. Yu. Mikaelyan, V. N. Chernykh // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2019. – No. 2. – URL:

– URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (дата обращения: 18.09.2024).

11 **Капкаев, А. А.** Алгоритм выбора металлизированного волоконно-оптического кабеля для его работы в качестве комбинированного экранирующего провода тяговой сети электрических железных дорог / А. А. Капкаев, Е. Ю. Микаэльян // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3850 (дата обращения: 18.09.2024).

12 **Дынькин, Б. Е.** Анализ отказов релейных защит путем статистического моделирования их работы / Б. Е. Дынькин // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 24–28.

13 Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи / Е. А. Стороженко, А. С. Кляморов, Д. Е. Стороженко, К. С. Гукасов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645 (дата обращения: 18.09.2024).

ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (date of access 09/18/2024).

11 **Капкаев, А. А.** Algorithm for selecting a metallized fiber-optic cable for its operation as a combined shielding wire of the traction network of electric railways / A. A. Kapkaev, E. Yu. Mikaelyan // Engineering Bulletin of the Don. – 2016. – No. 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3850 (date of access 09/18/2024).

12 **Dynkin, B. E.** Analysis of relay protection failures by statistical modeling of their operation / B. E. Dynkin // Collection of scientific papers of the International scientific and practical conference “Energy of transport. Actual problems and tasks” ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2019. – P. 24–28.

13 Reducing the influence of the electric field of high-voltage power lines on fiber-optic communication lines / E. A. Storozhenko, A. S. Klyamorov, D. E. Storozhenko, K. S. Gukasov // Engineering Bulletin of the Don. – 2013. – No. 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1645 (date of access 09/18/2024).

V. A. Osipov

INTEGRATION OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES WITH THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM AS A WAY TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF RAILWAYS

Abstract. The article is devoted to the issues of using fiber-optic communication lines laid on the supports of the contact network as elements of the traction power supply system. The option of abandoning the use of dielectric cables of the OKSN type, currently used, and the transition to cables made of conductive material, in particular, to OKGT cables, is considered. The paper provides examples of using OKGT cables as part of existing traction networks to achieve the goals of increasing the energy efficiency of the transportation process. Among them, there is an example of organizing electrically compensated traction networks without laying additional conductors, increasing the reliability of the group grounding system of supports, as well as organizing a lightning protection contact network of a section of the railway.

Keywords: fiber-optic communication line, energy efficiency, traction network, group grounding of supports, lightning protection.

For citation: Osipov, V. A. Integration of fiber-optic communication lines with the traction power supply system as a way to increase the energy efficiency of railways / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 139–147. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_139.

Сведения об авторах**Осипов Владимир Александрович**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
заведующий кафедрой,
декан гуманитарного факультета,
e-mail: dw_@rambler.ru

Information about the authors**Osipov Vladimir Alexandrovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Basis of Electrical
Engineering»,
Head of the Chair,
Dean of the Humanitarian Department,
E-mail: dw_@rambler.ru

Т. Л. Риполь-Сарагоси

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТНОСТИ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ СЖАТОГО ВОЗДУХА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ АЛЮМОГЕЛЯ

Аннотация. Материал данной статьи посвящен рассмотрению влияния таких показателей, как относительная влажность атмосферного воздуха, скорость движения сжатого воздуха через адсорбер, требуемый класс чистоты сжатого воздуха по влагосодержанию в соответствии с действующими нормативными документами, порозность адсорбента на энергозатратность технологических процессов адсорбционной осушки. В качестве объекта исследований выбран адсорбент алюмогель, а точнее четыре его наиболее используемые в промышленности модификации. В статье представлены результаты исследований по определению энергоэффективности каждой из четырех выбранных модификаций алюмогеля. На основании анализа полученных результатов сформулированы выводы и предложения, обозначена практическая значимость проведенных исследований.

Ключевые слова: алюмогель, модификация, энергоэффективность, сжатый воздух, класс чистоты, влагосодержание, энергия.

Для цитирования: Риполь-Сарагоси, Т. Л. Исследование энергозатратности процесса адсорбционной осушки сжатого воздуха при использовании различных модификаций алюмогеля / Т. Л. Риполь-Сарагоси // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3. – С. 148–155. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_148.

Введение

Вопросы своевременной доставки пассажиров к месту назначения и грузов к месту их приемки зависят от многих факторов, в числе которых одно из значимых мест занимает качество сжатого воздуха, который в свою очередь, являясь технологическим энергоносителем и одновременно рабочей средой пневмосистем подвижного состава, отвечает за качество технологических процессов, которыми он управляет. К этим факторам относятся такие показатели, как надежность и безопасность движения поездов. Помимо управления процессами торможения сжатый воздух в пневматических системах подвижного состава железных дорог и промышленного транспорта управляет системами открытия и закрытия дверей, подачей песка на железнодорожное полотно и разгрузкой думпкаров тяговых агрегатов. Таким образом, качество сжатого воздуха по параметру «влагосодержание», зависящее от содержания в нем влаги как в капельно-дисперсном, так и парообразном состояниях, должно быть высоким и соответствовать принятым нормативно-правовым документам. Для проектирования технологических схем подготовки сжатого воздуха для конкретного производственного процесса необходимо знать нормативно-правовую базу, регламентирующую требуемое его качество в соответствии со спецификой предполагаемого использования. Для нормирования качества сжатого воздуха в Российской Федерации существуют три основных документа: ГОСТ 32202-2013 «Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава», ГОСТ 17433-80 «Промышленная чистота. Сжатый воздух. Классы загрязненности», ISO 8573-1:2010 «Compressed air Part 1: Contaminants and purity classes».

Материалы и методы

Величины основных показателей, таких как содержание взвешенных частиц, масла и влаги, определяющих соответствие сжатого воздуха требованиям нормативных документов, определяют исключительно в характерных точках, которыми могут являться: «вход в компрессор», «вход в первый главный резервуар», «выход из последнего главного резервуара – вход в адсорбер», «выход из адсорбера». Условное деление пневмосистемы подвижного состава может содержать и другие модули, которые потребуют наличия дополнительных характерных точек контроля параметров сжатого воздуха, однако неизменными останутся подлежащие определению показатели, а именно: концентрацию твердых частиц, масла и влаги. Наименование этих показателей и единицы их измерения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества сжатого воздуха и их единицы измерения

Наименование показателя	Показатель	Единица измерения
Твердые частицы	Максимальный размер частиц	мкм
	Массовая концентрация	мг/м ³
Масло	Массовая концентрация	мг/м ³
Вода	Точка россы	°С
* Показатели должны быть приведены к абсолютному давлению воздуха 10 ⁵ Па		

Значения показателей качества сжатого воздуха должны соответствовать значениям, представленным в [1]. И здесь следует обратить внимание на требуемую (по основополагающему документу) температуру точки росы сжатого воздуха, с которой он поступит к тормозным приборам, в системы управления закрытием и открытием дверей, подачей песка на рельсы, а также в разгрузочные магистрали на цилиндры-опрокидыватели думпкаров тяговых агрегатов. Достигнутая в результате адсорбции влаги из сжатого воздуха величина его температуры точки росы должна быть на 5–7 градусов ниже температуры атмосферного воздуха для исключения выпадения из него влаги при дальнейшем возможном его охлаждении. Согласно требованиям второго и первого классов чистоты, ее значения могут варьироваться от –40 до –70 °С. Такие показатели по влагосодержанию сжатого воздуха можно достичь исключительно с помощью использования технологии адсорбционной осушки сжатого воздуха. Предположительно затраты энергии на сжатие воздуха при использовании адсорбционной осушки сжатого воздуха для достижения вышеобозначенных показателей температуры точки росы будут возрастать, однако характер и степень их предполагаемого возрастания, влияние на них показателей атмосферного воздуха, теплофизических свойств адсорбента предстоит определить в ходе проводимых исследований.

В качестве применяемого адсорбента был выбран алюмогель, а точнее четыре его наиболее широко используемые в промышленности модификации. Далее при проведении представленных в статье научных исследований были использованы методы анализа, синтеза, сравнения, разработка вычислительного алгоритма.

Сформируем табл. 2, содержащую характеристики рассматриваемых модификаций алюмогеля.

Таблица 2

Основные характеристики исследуемых алюмогелей

Вид адсорбента	Alumac 1,5-3 A	Alumac 2-5 D	Alumac AA-XR 101-CN	BASF F-200
Характеристика				
Суммарный объем пор, см ³ /г	0,44	0,44	0,48...0,5	0,5
Насыпная плотность, кг/м ³	800...880	780...860	740...880	769
Влагоёмкость, %	37,5	39	44	42

Обсуждение

Энергетические затраты, связанные с сжатием воздуха в компрессоре, а вернее их увеличение, неизбежно будут зависеть от величины сопротивления адсорбента движению через него сжатого воздуха, выражающееся в падении его давления ΔP при прохождении через адсорбер, а это несомненно скажется на увеличении количества потребляемой энергии компрессором ΔN . Расчеты по определению ΔN для описанных выше условий проводились с использованием методики, представленной в работах автора [2–3] для других адсорбентов (модификаций силикагеля и цеолита). При этом представленные расчеты проводились для максимально возможной скорости движения сжатого воздуха через адсорбер, равной 0,5 м/с, давления 9 бар. За показатели качества сжатого воздуха по параметру «влагосодержание» рассматривались показатели, требуемые к достижению согласно второму и первому классам чистоты [1]. Расчеты потерь давления были определены согласно методике [2–6], а их результаты для

максимально возможной скорости движения сжатого воздуха через адсорбер, равной 0,5 м/с и изменяющейся относительной влажности атмосферного воздуха в выше обозначенных пределах сведены в табл. 3.

Таблица 3

Потери давления сжатого воздуха при его движении через адсорбер

Класс чистоты и скорость	Относительная влажность, %	Сопротивление, ΔP , бар			
		Alumac 1,5-3 A	Alumac 2-5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
1	2	3	4	5	6
2; 0,5 м/с	50	0,461	0,466	0,456	0,444
	60	0,553	0,559	0,548	0,534
	70	0,646	0,653	0,640	0,623
	80	0,738	0,746	0,731	0,712
	90	0,831	0,840	0,823	0,802
	100	0,923	0,933	0,915	0,891
1; 0,5 м/с	50	0,463	0,468	0,458	0,446
	60	0,555	0,561	0,550	0,536
	70	0,648	0,655	0,642	0,625
	80	0,740	0,748	0,733	0,714
	90	0,833	0,842	0,825	0,804
	100	0,926	0,936	0,917	0,893

Падение давления сжатого воздуха при прохождении его через адсорбер неизбежно повлечет за собой увеличение потребляемой мощности компрессором, расходуемой на сжатие атмосферного воздуха.

Таблица 4

Увеличение потребления мощности на привод компрессора

Класс чистоты и скорость	Относительная влажность, %	Энергозатраты на привод компрессора ΔW , Вт			
		Alumac 1,5-3 A	Alumac 2-5 D	Alumac AA-XR 101-CH	BASF F-200
1	2	3	4	5	6
2; 0,5 м/с	50	1756,7	1775,3	1740,4	1696,4
	60	2099,3	2121,4	2079,9	2027,6
	70	2438,7	2464,2	2416,2	2355,8
	80	2774,8	2803,7	2749,4	2680,9
	90	3107,7	3140	3079,4	3003
	100	3437,5	3473	3406,3	3322,2
1; 0,5 м/с	50	1764,6	1783,2	1748,2	1704
	60	2107,1	2129,3	2087,7	2035,2
	70	2446,4	2472,1	2423,9	2363,2
	80	2782,5	2811,5	2757	2688,3
	90	3115,3	3147,7	3086,9	3010,3
	100	3445,1	3480,6	3413,8	3329,5

Полученные расчетным путем и представленные в табл. 3 и 4 данные по падению давления сжатого воздуха на адсорбере и связанное с этим падением увеличение потребляемой мощности на валу компрессора, представим в виде графической интерпретации на рис. 1 и 2.

Анализируя представленные в табл. 3 и 4 рассчитанные величины ΔP и ΔN , а также их графическую интерпретацию в обозначенных выше координатах, можно констатировать, что требуемое в соответствии с первым и вторым классом чистоты влажосодержание для достижения температур точки росы -40 и -70 °C вышеобозначенных условий потребует увеличения расхода энергии на адсорбционные процессы. Это увеличение при максимально возможной скорости движения сжатого воздуха через адсорбер будет зависеть как от его относительной влажности, так и от модификации алюмогеля.

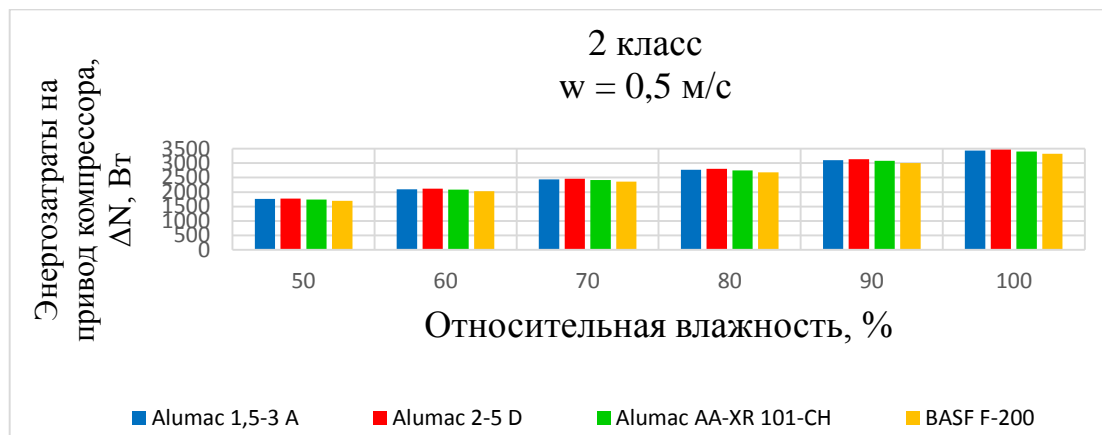


Рис. 1. Влияние относительной влажности и физических характеристик различных модификаций алюмогеля на энергетические затраты на привод компрессора

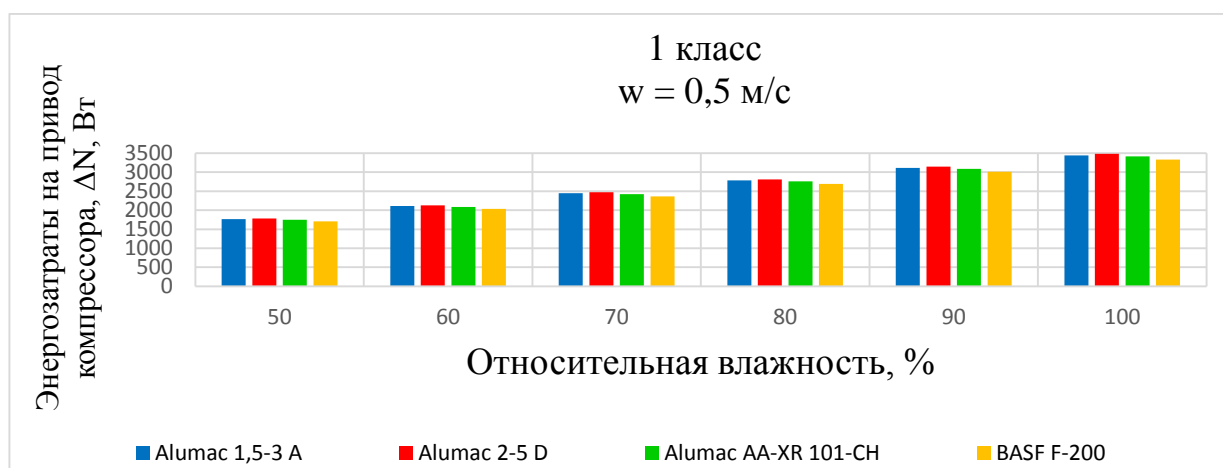


Рис. 2. Влияние относительной влажности и физических характеристик различных модификаций алюмогеля на энергетические затраты на привод компрессора

Анализ представленных гистограмм позволяет сделать вывод о наличии прямой зависимости между увеличением расхода энергии на привод компрессора, зависящем от величины сопротивления, возникающего при движении сжатого воздуха через адсорбер и определяющим эту величину падением давления на нем, изменением относительной влажности атмосферного воздуха и требуемым классом его чистоты на выходе из адсорбера для исследуемых модификаций алюмогеля. Очевидно, здесь можно утверждать, что наименее энергозатратным является алюмогель марки BASF F-200, а наиболее энергозатратен алюмогель марки Alumac 2-5 D. Разница в падении давления при адсорбции на алюмогеле марки Alumac 2-5 D и марки BASF F-200 при указанных выше условиях находится в пределах 4,5 % Это означает, что в единицу времени для наиболее энергозатратных режимов потребление электрической энергии будет возрастать на 151,1 Вт. Для определения количества потребляемой электрической энергии в условиях протекания адсорбционного процесса при суточной поездной работе локомотива необходимо знать величину ПВ (последовательность включения) компрессора и его технические характеристики. Расчеты и их графическая интерпретация также показали, что величина, характеризующая в процентном отношении увеличение потребления электрической энергии компрессором при сжатии воздуха с использованием адсорбции в качестве технологии осушения сжатого воздуха, остается постоянной при повышении требований к качеству сжатого воздуха в соответствии с принятыми

нормативными документами при переходе от второго класса чистоты к первому. При этом увеличение потребляемой энергии на привод компрессора для рассмотренных выше потерь давления на адсорбере будет составлять примерно 4,3 %. Неверным было бы не рассматривать влияние порозности представленных модификаций алюмогеля на величины потерь сопротивления в адсорбере и увеличение энергозатратности процесса сжатия на компрессоре. Такие расчеты проводились для четырех модификаций цеолитов по методике, описанной в [3, 6–10]. Используя данную методику определения вышеобозначенных энергетических затрат, представим их графическую интерпретацию для различных классов чистоты на рис. 3 и 4.

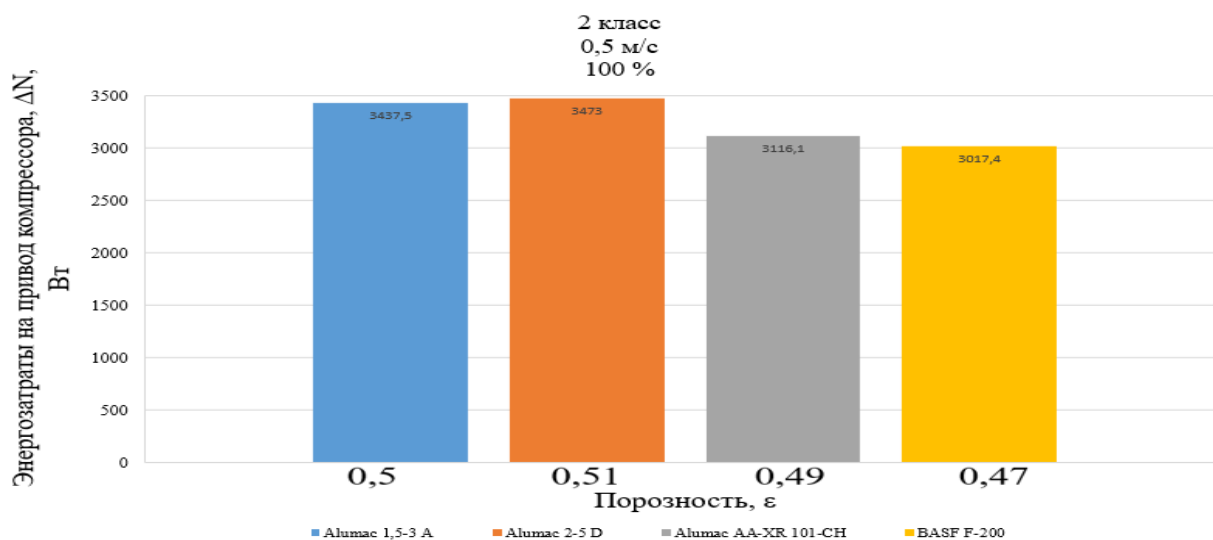


Рис. 3. Потери мощности на привод компрессора в зависимости от вида алюмогеля и значения порозности

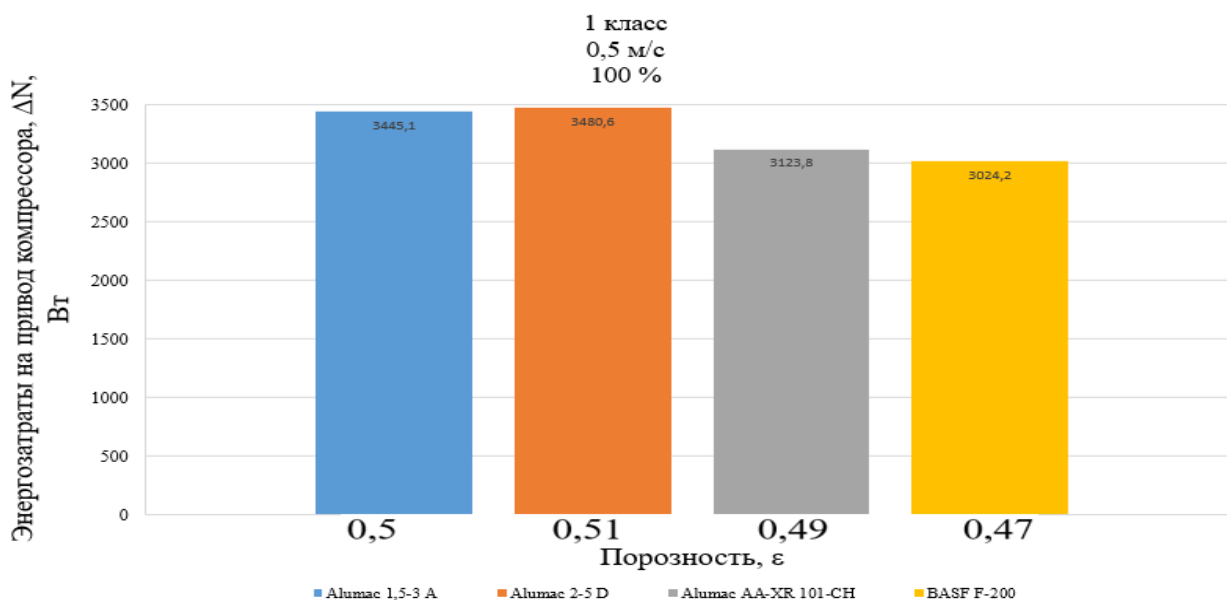


Рис. 4. Потери мощности на привод компрессора в зависимости от вида алюмогеля и значения порозности

Несмотря на установленную ранее [10] значительную зависимость потерь энергии при адсорбции влаги из сжатого воздуха на различных модификациях силикагеля и цеолита, логично было бы проанализировать аналогичную зависимость на рассматриваемых модификациях алюмогеля. Рассчитанные величины потерь энергии для четырех модификаций алюмогеля позволяют констатировать, что

различие в величине порозности между самым энергозатратным и самым энергоэффективным алюмогелем в нашем случае для обоих классов чистоты лежит в пределах 7,8 %, при этом влияние порозности на энергетические потери на привод компрессора для второго класса чистоты лежит в пределах 13,8 %, а для первого класса – 14,3 %.

Выводы

Анализ представленных выше зависимостей согласуется с выявленной ранее тенденцией, а именно: энергозатратность рассматриваемых марок адсорбентов зависит в том числе от их порозности, однако эта зависимость, ввиду незначительной разности в ее величинах у указанных модификаций адсорбента, не превышает 6,2 % между самым энергозатратным и самым энергоэффективным видом алюмогеля. Но, поскольку такая зависимость существует, она должна быть учтена при формировании рекомендаций по приоритетам использования того или иного вида алюмогеля. Важно то, что установлено наличие влияния величины порозности адсорбента на изменение энергетических затрат на сжатие воздуха в компрессоре.

Таким образом, в качестве рекомендации для практического использования результатов проведенных исследований влияния вышеобозначенных факторов на энергозатратность четырех видов алюмогеля рекомендуем использовать алюмогель BASF F-200 как наиболее энергоэффективный, учитывая данный фактор на стадии проектирования технологических схем адсорбционной осушки сжатого воздуха при использовании исследуемых модификаций алюмогеля.

Список литературы

- 1 **ГОСТ 32202-2013.** Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 8 с.
- 2 Исследование возможностей снижения энергоёмкости адсорбционных процессов при высоких требованиях к влагосодержанию сжатого воздуха / Т. Л. Риполь-Сарагоси, А. А. Воробьев, А. А. Соболев, А. Н. Цыбульский // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 4. – С. 187–200. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-4-187-200.
- 3 **Риполь-Сарагоси, Т. Л.** Исследование энергоэффективности процессов осушки сжатого воздуха с использованием цеолитов различных марок / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 132–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_132.
- 4 Перспективы использования адсорбционных технологий для подготовки газа к транспорту / С. Ю. Кондауров, И. И. Артемова, М. М. Кручинин [и др.] // Газовая промышленность. – 2010. – № 10 (651). – С. 52–55. – EDN MUZACF.
- 5 **Патент № 2663667 С2.** Российская Федерация, МПК В01J 23/24, В01J 23/74, В01J 23/882. Катализатор гидроочистки, содержащий подложку, полученную из алюмогеля, и способ получения такого катализатора : № 2015125559 : заявл. 26.11.2013 : опубл. 08.08.2018 / А. Додэн, Э. Девер, М. А. Лелиа ; заявитель ИФП ЭНЕРЖИ НУВЕЛЛЬ. – EDN QKJVS.
- 6 Сравнительные адсорбционные свойства термохимически модифицированных кремнеземных сорбентов и алюмогеля / В. П. Горшунова,

References

- 1 **GOST 32202-2013.** Compressed air of pneumatic systems of railway rolling stock. – Moscow : Standartinform, 2019. – 8 p.
- 2 Investigation of the possibilities of reducing the energy intensity of adsorption processes with high requirements for the moisture content of compressed air / T. L. Ripol-Saragosi, A. A. Vorobyov, A. A. Sobolev, A. N. Tsybulsky // Bulletin of the results of scientific research. – 2023. – No. 4. – P. 187–200. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-4-187-200.
- 3 **Ripol-Saragosi, T. L.** Investigation of the energy efficiency of compressed air drying processes using zeolites of various brands / T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 132–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_132.
- 4 Prospects of using adsorption technologies for gas preparation for transport / S. Yu. Kondaurov, I. I. Artemova, M. M. Kruchinin [et al.] // Gas industry. – 2010. – No. 10 (651). – P. 52–55. – EDN MUZACF.
- 5 **Patent No. 2663667 C2.** Russian Federation, IPC B01J 23/24, B01J 23/74, B01J 23/882. Hydrotreating catalyst containing a support obtained from alumina gel, and a method for producing such a catalyst : No. 2015125559 : declared 26.11.2013 : published 08.08.2018 / A. Dodin, E. Dever, M. A. Lelia ; applicant IFP ENERGY NOUVELLE. – EDN QKJVS.
- 6 Comparative adsorption properties of thermochimically modified silica sorbents and alumogel

А. В. Рыльков, О. В. Чибисова, В. А. Небольсин // Химия, новые материалы, химические технологии : внутривузовский сборник научных трудов Том 1. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2011. – С. 81–86. – EDN NRSCUV.

7 **Кожевникова, И. В.** Промышленные отходы силикагеля, цеолита и алюмогеля как основная составляющая полиуретановых композиционных материалов / И. В. Кожевникова, Т. Р. Сафиуллина, Л. А. Зенитова // Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии : материалы IX Международной научно-практической конференции, Нижнекамск, 05–07 апреля 2016 года. – Нижнекамск : ПАО «Нижнекамскнефтехим», 2016. – С. 56. – EDN WIPOZP.

8 Влияние затравки на кристаллизацию α -Al₂O₃ в алюмогелях / А. В. Галахов, В. А. Зеленский, Е. В. Шелехов, Л. В. Коваленко // Новые огнеупоры. – 2014. – № 2. – С. 48–50. – EDN RWQRED.

9 Порошки -al₂o₃ из аморфного алюмогеля / А. В. Галахов, В. А. Зеленский, Н. А. Аладьев, Л. В. Коваленко // Неорганические материалы. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 248. – DOI 10.7868/S0002337X15030045.

10 **Риполь-Сарагоси, Т. Л.** Снижение энергоёмкости процесса адсорбции при использовании композитных адсорбентов / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2021 года. Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 83–86. – EDN WCTFHI.

/ V. P. Gorshunova, A. V. Rylkov, O. V. Chibisova, V. A. Nebolsin // Chemistry, new materials, chemical technologies : intra-university collection of scientific papers Volume 1. – Voronezh : Voronezh State Technical University, 2011. – P. 81–86. – EDN NRSCUV.

7 **Kozhevnikova, I. V.** Industrial waste of silica gel, zeolite and alumogel as the main component of polyurethane composite materials / I. V. Kozhevnikova, T. R. Safiullina, L. A. Zenitova // The current state and prospects of innovative development of petrochemistry : proceedings of the IX International scientific and practical conference, Nizhnekamsk, 05–07 April 2016. Nizhnekamsk : Nizhnekamskneftekhim Public Joint Stock Company, 2016. – P. 56. – EDN WIPOZP.

8 The effect of seed on the crystallization of α -Al₂O₃ in aluminogels / A. V. Galakhov, V. A. Zelensky, E. V. Shelekhov, L. V. Kovalenko // New refractories. – 2014. – No. 2. – P. 48–50. – EDN RWQRED.

9 Powders -al₂o₃ from amorphous alumogel / A. V. Galakhov, V. A. Zelensky, N. A. Aladyev, L. V. Kovalenko // Inorganic materials. – 2015. – Vol. 51, No. 3. – P. 248. – DOI 10.7868/S0002337X15030045.

10 **Ripol-Saragosi, T. L.** Reduction of the energy intensity of the adsorption process when using composite adsorbents / T. L. Ripoll-Saragosi, M. A. Gladkikh // Transport : science, education, production : collection of scientific papers of the International scientific and practical conference, Rostov-on-Don, April 19-21, 2021. Volume 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 83–86. – EDN WCTFHI.

T. L. Ripol-Saragosi

INVESTIGATION OF THE ENERGY CONSUMPTION OF THE PROCESS OF ADSORPTION DRYING OF COMPRESSED AIR USING VARIOUS MODIFICATIONS OF ALUMOGEL

Abstract. The material of this article is devoted to the consideration of the influence of such indicators as the relative humidity of atmospheric air, the speed of movement of compressed air through the adsorber, the required purity class of compressed air in terms of moisture content in accordance with current regulatory documents, the porosity of the adsorbent on the energy consumption of technological processes of adsorption drying. The adsorbent alumogel, or rather its four most widely used industrial modifications, was chosen as the object of research. The article presents the results of research to determine the energy efficiency of each of the four selected modifications of alumogel. Based on the analysis of the results obtained, conclusions and suggestions are formulated, and the practical significance of the research is indicated.

Keywords: alumogel, modification, energy efficiency, compressed air, purity class, moisture content, energy.

For citation: Ripol-Saragosi, T. L. Investigation of the energy consumption of the process of adsorption drying of compressed air using various modifications of alumogel / T. L. Ripol-

Saragosi // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3. – P. 148–155. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_3_148.

Сведения об авторах

Риполь-Сарагоси Татьяна Леонидовна

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Теплоэнергетика на железнодорожном
транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: Ripol-saragosi@mail.ru

Information about the authors

Ripol-Saragosi Tatiana Leonidovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Heat Power Engineering on Railway
Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: Ripol-saragosi@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

1 **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисуночная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В. И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно через агентство подписки «Урал-Пресс» и агентство «АРЗИ», распространяется журнал на территории Российской Федерации. Подписку можно оформить на квартал, на полгода или на год.

Журнал «Вестник РГУПС» бесплатно рассылается всем отраслевым вузам, в ряд вузов Министерства образования и науки России, центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации.

Почтовый адрес редакции:

3344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.
Ростовский государственный университет путей сообщения.

Редакция журнала «Вестник РГУПС».

Телефон: +7 (863) 272-62-74. Факс: +7 (863) 255-37-85.

E-mail: pmv_nis@rgups.ru; nis@rgups.ru (дополнительный).

Архив журнала и требования по оформлению статей размещены на сайте <http://vestnik.rgups.ru>.

Научное издание

ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета
путей сообщения

Научно-технический журнал

№ 3 (95)
2024

Уважаемые читатели!
Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rg.ru.
Индекс журнала по каталогу 53720

Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте
Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования
РИНЦ и Science Index

Требования к оформлению статей размещены на сайте
<http://vestnik.rgups.ru>

Редакторы: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Куделиной

Подписано в печать 26.09.2024.
Дата выхода в свет 27.09.2024.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 18,36.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 40.
Заказ .

Учредитель :

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета, издателя, редакции:
344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, зд. 2.
Телефон редакции +7 (863) 272-62-74; факс +7 (863) 255-37-85.
E-mail: pmv_nis@sci.rgups.ru; nis@rgups.ru

Адрес типографии :
«Издательство «D&V». Св-во № 003679887.
344037, г. Ростов-на-Дону, ул. 20 линия, 54.
E-mail: divprint@mail.ru. Телефон +7 (918) 543-75-63.