

# ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 1 (54)  
2026



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается  
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

**Главный редактор журнала**  
**В. И. Лысак** – академик РАН,  
д-р техн. наук, профессор

**Редакционная коллегия:**

Е. В. Балакина – д.т.н., проф. ВолгГТУ  
А. В. Баранов – д.ф.-м.н.,  
проф. РГУ нефти и газа, г. Москва  
А. Б. Голованчиков – д.т.н., проф. ВолгГТУ  
А. Е. Городецкий – д.т.н.,  
проф. ИИМаш РАН, г. Санкт-Петербург  
А. В. Дмитриев – д.т.н.,  
проф. КГЭУ, г. Казань  
А. Ю. Дунин – д.т.н., проф. МГТУ  
(МАДИ), г. Москва  
А. С. Дьяков – д.т.н., проф. МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, г. Москва  
В. Ф. Желтобрюхов – д.т.н.,  
проф. ВолгГТУ, г. Волгоград  
А. В. Келлер – д.т.н., проф. Московского  
политехнического университета, г. Москва  
И. А. Коняхин – д.т.н., проф. ИТМО,  
г. Санкт-Петербург  
В. В. Коротяев – д.т.н., проф. ИТМО,  
г. Санкт-Петербург  
А. А. Львов – д.т.н., проф. СГТУ  
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов  
В. А. Марков – д.т.н., проф. МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, г. Москва  
Е. Р. Мошев – д.т.н.,  
проф. ПНИПУ, г. Пермь  
А. Е. Новиков – чл.-корр. РАН, д.т.н.,  
проф. ВолгГТУ  
Е. А. Федянов – д.т.н., проф. ВолгГТУ  
Н. М. Филькин – д.т.н., проф. ИжГТУ  
им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск  
А. Н. Шилин – д.т.н., проф. ВолгГТУ

Ответственный секретарь  
П. С. Васильев – к.т.н., доц. ВолгГТУ  
Тел. +7 (8442) 24-84-31

Журнал распространяется  
по подписке.  
Индекс журнала  
по объединенному каталогу  
«Пресса России» – 94193  
[https://www.pressa-  
rf.ru/cat/1/edition/y\\_e94193/](https://www.pressa-<br/>rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/)

**Тел. издательства ВолгГТУ:**  
+7 (8442) 24-84-08  
+7 (8442) 24-84-05  
**e-mail:** zavrio@vstu.ru

# Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт

## научно-технический журнал

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору  
в сфере связи, информационных технологий и массовых  
коммуникаций (Роскомнадзор)  
ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.

№ 1 (54)  
Март  
2026

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**  
**ФГБОУ высшего образования**  
**«Волгоградский государственный технический**  
**университет»**  
**Периодичность: четыре раза в год**

**Адрес редакции:**  
РФ, 400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28  
Гл. редактор: телефон: +7 (8442) 24-80-03  
**e-mail:** lysak2@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: +7 (8442) 24-84-31  
**e-mail:** pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru)

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Авторское право на журнал в целом принадлежит**  
**Учредителю, на отдельные статьи – сохраняется за авторами**

*Перепечатка из журнала «Энерго- и ресурсосбережение:  
промышленность и транспорт» категорически запрещена без  
оформления договора в соответствии с действующим  
законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Энерго-  
и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» обязательна*

*Статьи печатаются бесплатно*



Published since  
January 2004 г.

# **Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport**

(Energy and Resource Saving:  
Industry and Transport)  
science-technical journal

ISSN 2500-0586

Journal is registered in the Federal Service for supervision  
of communications, information technology and mass media  
(Roscomnadzor) registration certificate:  
ПН N° (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

## **Editor-in-chief**

**V. I. Lysak** – Academician of RAS,  
D. Sc. (Technical), Professor

### **Editorial Board:**

E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),  
Prof., VSTU, Volgograd  
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),  
Prof., Gubkin University, Moscow.  
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),  
Prof., VSTU, Volgograd  
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),  
Prof., IPME, St. Petersburg  
A. V. Dmitriev – D. Sc. (Engineering),  
Prof. KSPEU, Kazan  
A. Yu. Dunin – D. Sc. (Engineering),  
Prof. MADI, Moscow  
A. S. Dyakov – D. Sc. (Engineering),  
Prof. BMSTU, Moscow  
V. F. Zheltobryukhov – D. Sc. (Engineering),  
Prof. VSTU, Volgograd  
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering),  
Prof. Prof. Moscow Poly, Moscow  
I. A. Konyakhin – D. Sc. (Engineering),  
Prof. ITMO University, St. Petersburg  
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering),  
Prof. ITMO University, St. Petersburg  
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering),  
Prof. SSTU, Saratov  
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering),  
Prof. BMSTU, Moscow  
E. R. Moshev – D. Sc. (Engineering),  
Prof. PNRPU, Perm  
A. E. Novikov – Corresponding Member  
of RAS, D. Sc. (Engineering),  
Prof. VSTU, Volgograd  
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering),  
Prof. VSTU, Volgograd  
N. M. Filkin – D. Sc. (Engineering),  
Prof. ISTU, Izhevsk  
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),  
Prof. VSTU, Volgograd

Executive Secretary  
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.  
Тел. +7 (8442) 24-84-31

The journal is distributed by subscription.  
Index of the magazine according to the united  
catalog «Press of Russia» – 94193.  
[https://www.pressa-  
rf.ru/cat/1/edition/y\\_e94193/](https://www.pressa-<br/>rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/)

### **VSTU Publisher tel.:**

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

**e-mail:** zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,

«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2026

**№ 1 (54)  
March  
2026**

### **FOUNDER:**

**Federal State Budgetary Educational Institution of Higher  
Education «Volgograd State Technical University»**

**Periodicity:** four times per year

### **Editorial office address:**

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28

Editor-In-Chief: tel.: +7 (8442) 24-80-03

e-mail: lysak2@vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31

e-mail: pahp@vstu.ru

Official website: [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru)

Published by the decision of editorial review board  
of Volgograd State Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder,  
for separate articles – retained by the authors***

*Reprint from the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accordance with the current legislation of the Russia Federation*

*When reprint the materials, the citation to the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory*

*The articles are published for free*

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Баев Д. П. 30  
Балакина Е. В. 106, 112  
Богданова Ю. В. 30  
Болтовский М. А. 61  
Ганзин С. В. 92  
Голованов И. Ю. 6  
Голованчиков А. Б. 30, 38  
Двикат Диаа М М 112  
Долотов А. А. 83  
Дорохов С. Б. 61  
Дьяков А. С. 53, 74  
Евсеева А. В. 83  
Конченков В. И. 43  
Короляш Я. В. 106  
Коряков С. А. 98  
Косенко В. В. 98  
Кочетова М. С. 30  
Лавренюк А. Ю. 98  
Лагуткин М. Г. 6  
Лазаренков Н. М. 83  
Малахов А. В. 92  
Малиновский М. П. 61  
Наумова Г. А. 38  
Новиков А. Е. 30  
Польянов В. В. 11  
Потапов П. В. 83, 98  
Сабинин Е. А. 98  
Сарбаев Д. С. 106  
Сергиенко И. В. 112  
Сильченков Д. Д. 92  
Смолко Е. С. 61  
Смоляков М. В. 92  
Соколова С. А. 6  
Сомов А. В. 43  
Суркаев А. Л. 24  
Тарасов П. С. 43  
Федоров Д. С. 53, 74  
Шеховцов В. В. 83, 98  
Шишкин Г. А. 43  
Шурак А. А. 38

## AUTHOR INDEX

- Baev D. P. 30  
Balakina E. V. 106, 112  
Bogdanova Yu. V. 30  
Boltovsky M. A. 61  
Dolotov A. A. 83  
Dorokhov S. B. 61  
Dwikat Dიაა M M 112  
Dyakov A. S. 53, 74  
Evseeva A. V. 83  
Fedorov D. S. 53, 74  
Ganzin S. V. 92  
Golovanchikov A. B. 30, 38  
Golovanov I. Yu. 6  
Kochetova M. S. 30  
Konchenkov V. I. 43  
Korolyash Ya. V. 106  
Koryakov S. A. 98  
Kosenko V. V. 98  
Lavrenyuk A. Y. 98  
Lagutkin M. G. 6  
Lazarenkov M. M. 83  
Malakhov A. V. 92  
Malinovsky M. P. 61  
Naumova G. A. 38  
Novikov A. E. 30  
Polyanov V. V. 11  
Potapov P. V. 83, 98  
Sabinin E. A. 98  
Sarbaev D. S. 106  
Sergienko I. V. 112  
Shekhovtsov V. V. 83, 98  
Shishkin G. A. 43  
Shurak A. A. 38  
Silchenkov D. D. 92  
Smolko E. S. 61  
Smolyakov M. V. 92  
Sokolova S. A. 6  
Somov A. V. 43  
Surkaev A. L. 24  
Tarasov P. S. 43

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

### Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Голованов И. Ю., Соколова С. А., Лагуткин М. Г.</i> Повышение интенсивности теплопередачи двухтрубных теплообменных аппаратов при использовании профильных труб.....	6
<i>Польянов В. В.</i> Эффективность заземления в обеспечении ЭМС микропроцессорного оборудования промышленных объектов.....	11
<i>Суркаев А. Л.</i> Электромагнитное излучение оптического диапазона электрического взрыва проводников.....	24
<i>Богданова Ю. В., Голованчиков А. Б., Новиков А. Е., Баев Д. П., Кочетова М. С.</i> Влияние конструкции сегментных перегородок в кожухотрубном теплообменнике на интенсивность процесса теплопередачи.....	30
<i>Голованчиков А. Б., Шурак А. А., Наумова Г. А.</i> Экспериментальное исследование осаждения частиц тяжелых металлов в расплаве сплава «Вуда».....	38
<i>Конченков В. И., Сомов А. В., Тарасов П. С., Шишкин Г. А.</i> Разработка цифровой системы для регистрации электрокардиограммы и типа физической активности человека.....	43

### Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Дьяков А. С., Федоров Д. С.</i> Динамическая модель транспортного средства с всенаправленными колесами.....	53
<i>Малиновский М. П., Смолко Е. С., Болтовский М. А., Дорохов С. Б.</i> Стендовые исследования статических характеристик пневматического тормозного привода.....	61
<i>Дьяков А. С., Федоров Д. С.</i> Результаты теоретических и экспериментальных исследований движения транспортного средства с всенаправленными колесами.....	74
<i>Евсеева А. В., Лазаренков Н. М., Долотов А. А., Потапов П. В., Шеховцов В. В.</i> Анализ влияния возмущающих воздействий от двигателя и трансмиссии специального микроавтобуса на уровень шума в салоне и в кабине водителя.....	83
<i>Ганзин С. В., Смоляков М. В., Малахов А. В., Сильченко Д. Д.</i> Пути повышения безопасности движения велосипедов и средств индивидуальной мобильности на улично-дорожной сети городов.....	92
<i>Лавренко А. Ю., Потапов П. В., Шеховцов В. В., Косенко В. В., Коряков С. А., Сабинин Е. А.</i> Сравнительная расчетная оценка воздействия на почву колесного трактора на одинарных и сдвоенных колесах.....	98
<i>Балакина Е. В., Сарбаев Д. С., Короляш Я. В.</i> О воздействии единичной дорожной неровности на движение транспортного средства.....	106
<i>Балакина Е. В., Сергиенко И. В., Двигат Диана М М</i> Экспериментальное исследование относительной длины пятна контакта шин для легковых автомобилей.....	112
К сведению авторов.....	119

## CONTENTS

---

---

### Part 1. INDUSTRY

<i>Golovanov I. Yu., Sokolova S. A., Lagutkin M. G.</i> Increasing the intensity of heat transfer in two-tube heat exchangers with profiled pipes.....	6
<i>Polyanov V. V.</i> Effectiveness of grounding systems in ensuring electromagnetic compatibility of microprocessor equipment in industrial facilities.....	11
<i>Surkaev A. L.</i> Electromagnetic radiation of the optical range of electric explosion of conductors.....	24
<i>Bogdanova Yu. V., Golovanchikov A. B., Novikov A. E., Baev D. P., Kochetova M. S.</i> Influence of the design of segmental partitions in shell and tube apparatus on the intensity of the heat transfer process.....	30
<i>Golovanchikov A. B., Shurak A. A., Naumova G. A.</i> Experimental study of the deposition of heavy metal particles in the melt of the wood alloy.....	38
<i>Konchenkov V. I., Somov A. V., Tarasov P. S., Shishkin G. A.</i> Development of a digital system for recording electrocardiograms and physical activity types.....	43

### Part 2. TRANSPORT

<i>Dyakov A. S., Fedorov D. S.</i> Dynamic model of a vehicle with mecanum wheels.....	53
<i>Malinovsky M. P., Smolko E. S., Boltovsky M. A., Dorokhov S. B.</i> Bench studies of the static characteristics of a pneumatic brake drive.....	61
<i>Dyakov A. S., Fedorov D. S.</i> The results of theoretical and experimental studies of the movement of a vehicle with mecanum wheels.....	74
<i>Evseeva A. V., Lazarenkov M. M., Dolotov A. A., Potapov P. V., Shekhovtsov V. V.</i> Analysis of the influence of engine and transmission disturbing effects of a special minivan on noise level in the interior and in the driver's cabin.....	83
<i>Ganzin S. V., Smolyakov M. V., Malakhov A. V., Silchenkov D. D.</i> Ways to improve the safety of bicycles and personal mobility vehicles on the city road network.....	92
<i>Lavrenyuk A. Y., Potapov P. V., Shekhovtsov V. V., Kosenko V. V., Koryakov S. A., Sabinin E. A.</i> Comparative assessment of the soil impact of a wheel tractor on single and double wheels.....	98
<i>Balakina E. V., Sarbaev D. S., Korolyash Ya. V.</i> Of the impact of a single road bump on vehicle movement.....	106
<i>Balakina E. V., Sergienko I. V., Dwikat D. A. M M</i> Experimental study of the relative contact patch length for passenger car tires.....	112

## ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 66.045.123  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-6-11

Научная статья  
Original article

*И. Ю. Голованов, С. А. Соколова, М. Г. Лагуткин*

### ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ДВУХТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОФИЛЬНЫХ ТРУБ

Московский политехнический университет, Москва, Россия

✉ Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

**Аннотация.** В статье на основе результатов компьютерных исследований показано, что при использовании в двухтрубных теплообменных аппаратах профильных теплообменных труб увеличивается интенсивность теплопередачи за счет увеличения коэффициента теплоотдачи со стороны межтрубного пространства. На основании результатов компьютерного моделирования получены уточненные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства в двухтрубных теплообменных аппаратах с профилем теплообменных труб в форме эллипсоидов с количеством каспов 1–10.

**Ключевые слова:** двухтрубный теплообменный аппарат, профильные теплообменные трубы, повышение интенсивности теплопередачи, коэффициент теплоотдачи, расчет

**Для цитирования:** Голованов И. Ю., Соколова С. А., Лагуткин М. Г. Повышение интенсивности теплопередачи двухтрубных теплообменных аппаратов при использовании профильных труб. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 6–11. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-6-11.

#### Информация об авторах:

**Иван Юрьевич Голованов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств имени профессора М. Б. Генералова» Московского политехнического университета

<https://orcid.org/0009-0007-9073-1235>

e-mail: igol95@yandex.ru

**Светлана Анатольевна Соколова** – ассистент кафедры «Экологическая безопасность технических систем» Московского политехнического университета

<https://orcid.org/0009-0002-9106-1302>

e-mail: sveta-sveta1223@mail.ru

**Михаил Георгиевич Лагуткин** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств имени профессора М. Б. Генералова» Московского политехнического университета

<https://orcid.org/0000-0001-9615-0051>

e-mail: lag53@yandex.ru

#### Вклад авторов:

**И. Ю. Голованов** – определение цели исследования, анализ данных исследования, редактирование текста статьи.

**С. А. Соколова** – проведение исследования, оформление графических материалов и таблиц, написание текста статьи.

**М. Г. Лагуткин** – методология исследования, редактирование текста статьи

*I. Yu. Golovanov, S. A. Sokolova, M. G. Lagutkin*

**INCREASING THE INTENSITY OF HEAT TRANSFER  
IN TWO-TUBE HEAT EXCHANGERS WITH PROFILED PIPES**

**Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia**

✉ Ivan Yu. Golovanov, igol95@yandex.ru

**Abstract.** The article presents the results of computer simulation of the heat transfer process in two-tube heat exchangers. It is shown that the use of profiled heat exchange pipes increases the intensity of the process (due to an increase in the heat transfer coefficient from the inter-tube space). Based on the results of computer modeling, refined equations were obtained for determining the heat transfer coefficient of the inter-tube space in two-tube heat exchangers (with a profiled heat exchanger tube in the form of an epicycloid with 1–10 cusps).

**Keywords:** two-tube heat exchanger, profiled heat exchange pipes, increasing the intensity of heat transfer, heat transfer coefficient, calculation

**For citation:** Golovanov I. Yu., Sokolova S. A., Lagutkin M. G. Increasing the intensity of heat transfer in two-tube heat exchangers with profiled pipes. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 1(54): 6–11. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-6-11.

**Information about the authors:**

**Ivan Yu. Golovanov** – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «AO&ATP named after Prof. M. B. Generalov» of Moscow Polytechnic University; e-mail: igol95@yandex.ru

**Svetlana A. Sokolova** – Assistant of the department «Environmental safety of technical systems» of Moscow Polytechnic University; e-mail: sveta-sveta1223@mail.ru

**Mikhail G. Lagutkin** – dr. sci. (Eng.), professor of the department «AO&ATP named after Prof. M. B. Generalov» of Moscow Polytechnic University; e-mail: lag53@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Ivan Yu. Golovanov** – defining the purpose of the study, analyzing the research data, editing the text of the article.

**Svetlana A. Sokolova** – conducting research, design of graphic materials and tables, writing the text of the article.

**Mikhail G. Lagutkin** – research methodology, editing of the article text.

Одним из известных пассивных методов интенсификации процесса теплопередачи является использование профильных теплообменных труб [1–4]. Данное техническое решение позволяет увеличить площадь поверхности теплопередачи при сохранении габаритных размеров конструкции. В двухтрубных теплообменных аппаратах также повышается турбулентность потока теплоносителя межтрубного пространства. Соответственно, увеличивается коэффициент теплоотдачи, определяющий интенсивность всего процесса, если он меньше коэффициента теплоотдачи трубного пространства, так как коэффициент теплопередачи  $K$  меньше меньшего из коэффициентов теплоотдачи [2]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{saz}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи трубного пространства, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи межтрубного пространства, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta_{cm}$  – толщина теплопередающей стенки, м;  $\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности материала теплопередающей стенки, Вт/(м·К);  $R_{saz}$  –

термическое сопротивление загрязнений на теплопередающей стенке, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Помимо интенсивности процесса, важно учитывать и его эффективность, которая может определяться по удельному показателю [2]:

$$\Delta W = \frac{Q}{W}, \quad (2)$$

где  $\Delta W$  – удельные потери мощности при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт/Вт;  $Q$  – количество передаваемого тепла в теплообменном аппарате, Вт;  $W$  – потери мощности на перекачивание теплоносителей при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт.

В двухтрубном теплообменном аппарате потери мощности  $W$  определяются как:

$$W = V_1 \cdot \Delta P_1 + V_2 \cdot \Delta P_2, \quad (3)$$

где  $V_1$  – объемный расход теплоносителя трубного пространства, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta P_1$  – гидравлическое сопротивление трубного пространства, Па;  $V_2$  – объемный расход теплоносителя межтрубного пространства, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta P_2$  – гидравлическое сопротивление межтрубного пространства, Па.

Проведем оценку интенсивности и эффективности процесса теплопередачи в двухтруб-

ных теплообменных аппаратах типовой конструкции и с профилем теплообменных труб в форме эпициклоиды с использованием компь-

ютерного моделирования в программном комплексе «SolidWorks» с количеством каспов от 1 до 10 (рис. 1).

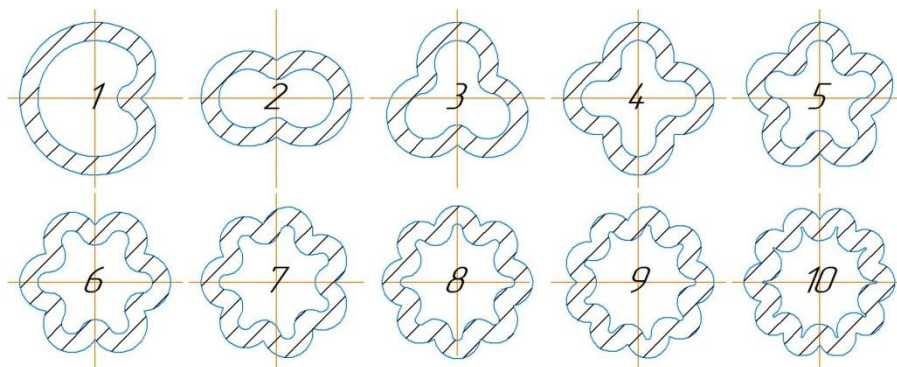


Рис. 1. Профиль теплообменных труб-эпициклоид:  
1 – 1 касп; 2 – 2 каспа; 3 – 3 каспа; 4 – 4 каспа; 5 – 5 каспов;  
6 – 6 каспов; 7 – 7 каспов; 8 – 8 каспов; 9 – 9 каспов; 10 – 10 каспов

Примем кожуховую трубу диаметром  $57 \times 4$  мм и длиной 1400 мм.

В качестве материала теплообменных аппаратов выберем сталь марки 08X18H10T (AISI 321) с теплоемкостью равной  $504 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  и коэффициентом теплопроводности равным  $17 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  [2].

Теплообменную трубу в типовой конструкции примем диаметром  $25 \times 3$  мм и длиной 1500 мм [2]. Эквивалентный диаметр труб-эпициклоид определим из условия равенства их площади поперечного сечения и теплообменной трубы двухтрубного теплообменного аппарата

типовой конструкции. Длина поверхности теплопередачи во всех конструкциях составляет 1400 мм [2].

Размеры патрубков межтрубного пространства определим из условия равенства их площади поперечного сечения с площадью поперечного сечения межтрубного пространства. Тогда патрубки будут выполнены из трубы диаметром  $50 \times 4$  мм. Длину патрубков примем равной 155 мм [5].

В таблице представлена площадь поверхности теплопередачи рассматриваемых конструкций двухтрубных теплообменных аппаратов.

Площадь поверхности теплопередачи двухтрубных теплообменных аппаратов

Конструкция двухтрубного теплообменного аппарата	Площадь поверхности теплопередачи, $\text{м}^2$
Типовая	0,110
Теплообменная труба-эпициклоида с 1 каспом	0,096
Теплообменная труба-эпициклоида с 2 каспами	0,123
Теплообменная труба-эпициклоида с 3 каспами	0,125
Теплообменная труба-эпициклоида с 4 каспами	0,127
Теплообменная труба-эпициклоида с 5 каспами	0,129
Теплообменная труба-эпициклоида с 6 каспами	0,130
Теплообменная труба-эпициклоида с 7 каспами	0,131
Теплообменная труба-эпициклоида с 8 каспами	0,132
Теплообменная труба-эпициклоида с 9 каспами	0,133
Теплообменная труба-эпициклоида с 10 каспами	0,133

Принятыми исходными технологическими параметрами являются: теплоносители трубного и межтрубного пространств – вода; температура

воды на входе в трубное пространство –  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура воды на входе в межтрубное пространство –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; объемный расход воды в труб-

ном пространстве –  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ; объемный расход воды в межтрубном пространстве будем изменять от  $6,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  до  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  (с шагом  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ), что будет соответствовать диапазону величины критерия Рейнольдса 10000–24000.

По итогам компьютерного моделирования

получена графическая зависимость эффективности процесса теплопередачи по удельным потерям мощности при эксплуатации двухтрубных теплообменных аппаратов  $\Delta W$  (2) от величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве (рис. 2).

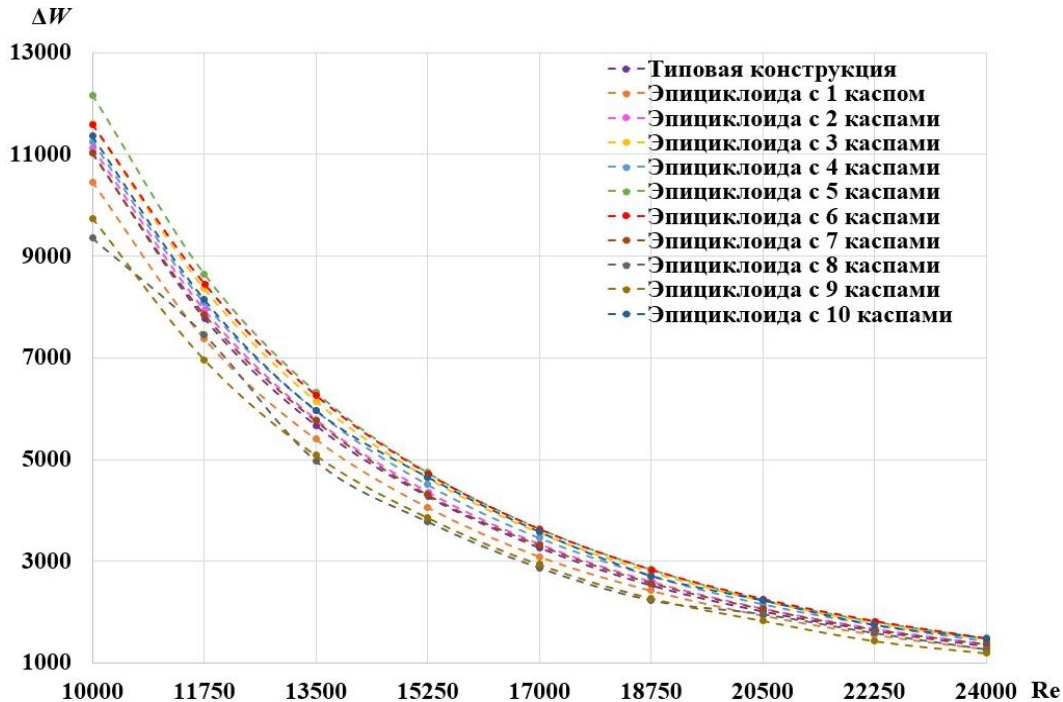


Рис. 2. Зависимость эффективности процесса теплопередачи от критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве двухтрубных теплообменных аппаратов

Из графика на рис. 2 можно сделать следующие выводы:

1) в конструкциях двухтрубных теплообменных аппаратов с теплообменными трубами с сечением в форме эллипсоидов с 2–7 и 10 каспами наблюдается повышение эффективности процесса теплопередачи, в сравнении с типовой конструкцией, во всем исследуемом диапазоне величины критерия Рейнольдса межтрубного пространства;

2) конструкции двухтрубных теплообменных аппаратов с теплообменными трубами с сечением в форме эллипсоидов с 1, 8, 9 каспами обеспечивают меньшую, в сравнении с типовой конструкцией, эффективность процесса теплопередачи во всем исследуемом диапазоне величины критерия Рейнольдса межтрубного пространства;

3) наибольшая эффективность процесса теплопередачи во всем исследуемом диапазоне величины критерия Рейнольдса межтрубного пространства наблюдается в конструкции двух-

трубного теплообменного аппарата с теплообменной трубой с сечением в форме эллипсоида с 5 каспами.

Изменение профиля теплообменной трубы отражается на интенсивности процесса теплопередачи за счет увеличения коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства, в сравнении с типовой конструкцией. На основании данных компьютерного моделирования для двухтрубных теплообменных аппаратов с теплообменной трубой с сечением в форме эллипсоида с 1–10 каспами получено универсальное уравнение расчета коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства с уточненными эмпирическими коэффициентами:

$$Nu = 5,25 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,204} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля,  $Pr_{cm}$  – критерий Прандтля при температуре теплопередающей стенки.

Уравнение (4) позволяет определять коэффициент теплоотдачи межтрубного пространства данных конструкций двухтрубных теплообменных аппаратов с высокой точностью (отклонения от результатов компьютерного моделирования менее 5 %). С использованием урав-

нения (4) получена графическая зависимость коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства двухтрубного теплообменного аппарата с теплообменной трубой-эпициклоидой с 1–10 каспами от величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве (рис. 3).

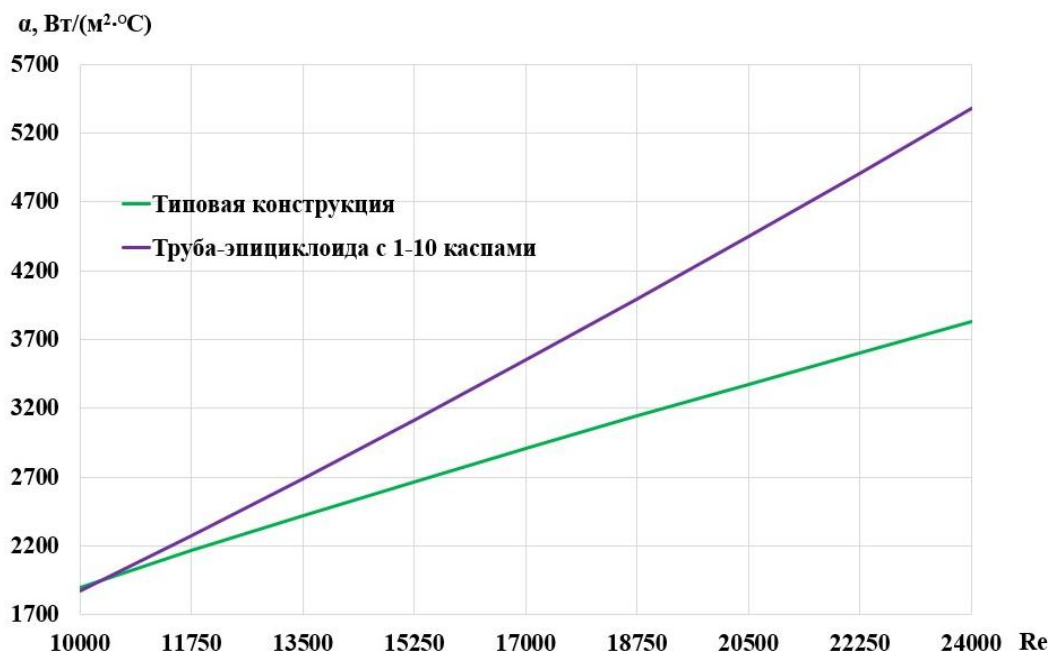


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства от величины критерия Рейнольдса в двухтрубных теплообменных аппаратах

На рис. 3 также показана зависимость коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства от величины критерия Рейнольдса в двухтрубном теплообменном аппарате типовой конструкции, определяемая с использованием известного уравнения [6]:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Из графика на рис. 3 заметно значительное увеличение коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства при использовании теплообменных труб с поперечным сечением в форме эпициклоиды с количеством каспов 1–10, в сравнении с типовой конструкцией двухтрубного теплообменного аппарата. В случае, когда коэффициент теплоотдачи межтрубного пространства является лимитирующим в двухтрубном теплообменном аппарате [2], использование труб-эпициклоид существенно повышает интенсивность процесса теплопередачи.

#### Выводы

1. С использованием компьютерного моделирования впервые представлены данные о эф-

фективности процесса теплопередачи в двухтрубных теплообменных аппаратах с теплообменными трубами с поперечным сечением в форме эпициклоид с 1–10 каспами.

2. На основании результатов компьютерного моделирования показано, что, в сравнении с типовой конструкцией двухтрубного теплообменного аппарата, в конструкциях с теплообменными трубами с сечением в форме эпициклоид с 2–7 и 10 каспами наблюдается более высокая эффективность процесса теплопередачи в диапазоне величины критерия Рейнольдса межтрубного пространства 10000–24000. Использование теплообменной трубы с сечением в форме эпициклоиды с 5 каспами обеспечивает наибольшую эффективность процесса теплопередачи.

3. Представленное уточненное уравнение расчета коэффициента теплоотдачи в межтрубном пространстве позволяет определять его с высокой точностью в двухтрубных теплообменных аппаратах с теплообменными трубами с поперечным сечением в форме эпициклоиды с 1–10 каспами.

4. С использованием полученного уравнения представлена графическая зависимость ко-

эффективности теплоотдачи межтрубного пространства от величины критерия Рейнольдса, показывающая значительное повышение интенсивности теплоотдачи со стороны межтрубного пространства при использовании теплообменных труб с поперечным сечением в форме эллипсоидов с 1–10 каспами, в сравнении с типовой конструкцией двухтрубного теплообменного аппарата.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чернявская, В. В. Анализ конструкций и перспективы совершенствования трубчатых теплообменных аппаратов / В. В. Чернявская, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов // Химическая технология. – 2025. – Т. 26, № 11. – С. 431–439. – URL: <https://www.doi.org/10.31044/1684-5811-2025-26-11-431-439>
2. Голованов, И. Ю. Оценка эффективности теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» различных конструкций / И. Ю. Голованов, К. О. Занина, М. Г. Лагуткин, С. А. Соколова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 4 (53). – С. 22–27. – URL: <https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2025-4-53-22-27>
3. Marzouk, S. A. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers / S. A. Marzouk, M. M. Abou Al-Sood, E. M. S. El-Said [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2023. – Vol. 148, № 15. – P. 7539–7578. – URL: <https://www.doi.org/10.1007/s10973-023-12265-3>
4. Чернявская, В. В. Оценка влияния профиля теплообменной трубы на энергоэффективность кристаллизаторов / В. В. Чернявская, В. Б. Сапожников, М. А. Угольникова, И. Ю. Голованов // Холодильная техника. – 2025. – Т. 114, № 2. – С. 77–84. – URL: <https://doi.org/10.17816/RF641891>
5. Лащинский, А. А. Конструирование сварных химических аппаратов: справочник / А. А. Лащинский; под ред. А. Р. Толчинского. – 2-е изд., стер. – М.: Альянс, 2008. – 384 с.

6. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

## REFERENCES

1. Chernyavskaya, V. V. Analysis of structures and prospects for improving tubular heat exchangers / V. V. Chernyavskaya, M. G. Lagutkin, I. Yu. Golovanov // Chemical Technology. – 2025. – Vol. 26, № 11. – P. 431–439. – URL: <https://www.doi.org/10.31044/1684-5811-2025-26-11-431-439>
2. Golovanov, I. Yu. Evaluation of the efficiency of tube-in-tube heat exchangers of various designs / И. Ю. Голованов, К. О. Занина, М. Г. Лагуткин, С. А. Соколова // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2025. – № 4 (53). – P. 22–27. – URL: <https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2025-4-53-22-27>
3. Marzouk, S. A. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers / S. A. Marzouk, M. M. Abou Al-Sood, E. M. S. El-Said [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2023. – Vol. 148, № 15. – P. 7539–7578. – URL: <https://www.doi.org/10.1007/s10973-023-12265-3>
4. Chernyavskaya, V. V. Evaluation of the effect of the heat exchange tube profile on the energy and mass efficiency of the crystallizers / V. V. Chernyavskaya, V. B. Sapozhnikov, M. A. Ugolnikova, I. Yu. Golovanov // Refrigeration Technology. – 2025. – Vol. 114, № 2. – P. 77–84. – URL: <https://doi.org/10.17816/RF641891>
5. Lashchinsky, A. A. Construction of welded chemical apparatuses: a reference book / A. A. Lashchinsky; edited by A. R. Tolchinsky. – 2nd edition, stereotypical. – M.: Alliance, 2008. – 384 p.
6. Pavlov, K. F. Examples and tasks in the course of processes and devices of chemical technology. Textbook for universities / K. F. Pavlov, P. G. Romankov, A. A. Noskov; edited by Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences P. G. Romankov. – 10th ed., revised and supplemented. – L.: Chemistry, 1987. – 576 p.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026, доработана 10.02.2026, подписана в печать 13.02.2026

The article was submitted 03.02.2026, revised 10.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 621.315.23:621.315.98

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-11-24

Научная статья

Original article

**В. В. Полянов**

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЗЕМЛЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭМС МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

✉ Валерий Валерьевич Полянов, [polyanovvv@mail.ru](mailto:polyanovvv@mail.ru)

**Аннотация.** В работе рассмотрена роль локального низкоиндуктивного технологического заземления в обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) микропроцессорного оборудования промышленных объектов в условиях воздействия высокочастотных коммутационных помех и импульсных перенапряжений в диапазоне 50 Гц – 1 МГц. Показано, что традиционное использование только защитного заземления на частотах выше 100–200 кГц становится малоэффективным из-за доминирующего вклада индуктивности соединительных проводников длиной 50 м и более. Предложена модель параллельного соединения двух контуров заземления: локального технологического вблизи защищаемого оборудования и удаленного защитного. Аналитически и численно определена частотная зависимость модуля эквивалентного импеданса. Расчеты показывают, что даже при

относительно высоком сопротивлении локального заземлителя (до 500 Ом) его наличие снижает импеданс системы на частоте 1 МГц на 17 %, а при сопротивлении 10 Ом эквивалентный импеданс уменьшается на 96 %, что существенно улучшает помехоустойчивость микропроцессорных устройств и систем ЧПУ.

Проведено сравнение эффективности типовых конфигураций заземлителей в высокоомном грунте ( $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) для одиночных и групповых вертикальных стержней и пластинчатых электродов. Установлено преимущество пластинчатых электродов для достижения минимального сопротивления. Выбор конфигурации заземляющего устройства требуется проводить на основании эффективности и ограничений, вызванных местными условиями промышленных предприятий.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения локального технологического заземления как ключевого средства повышения ЭМС промышленного оборудования и могут быть использованы при проектировании и реконструкции систем заземления производственных объектов.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, заземление коммутационные перенапряжения, ЧПУ, микропроцессорное оборудование, высокочастотные помехи

**Для цитирования:** Полянов В. В. Эффективность заземления в обеспечении ЭМС микропроцессорного оборудования промышленных объектов. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 11–24. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-11-24.

**Информация об авторе:**

**Валерий Валерьевич Полянов** – аспирант, старший преподаватель кафедры УЭР СГУПС

orcid: 0009-0002-9813-0585

e-mail: polyanovvv@mail.ru

*V. V. Polyakov*

**EFFECTIVENESS OF GROUNDING SYSTEMS IN ENSURING  
ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF MICROPROCESSOR  
EQUIPMENT IN INDUSTRIAL FACILITIES**

**Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia**

✉ Valeriy V. Polyakov, polyanovvv@mail.ru

**Abstract.** This paper investigates the role of local low-inductance technological grounding in ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of microprocessor-based equipment in industrial facilities subjected to high-frequency switching surges and transient overvoltages in the 50 Hz – 1 MHz range. It is demonstrated that relying solely on a remote protective grounding system becomes ineffective at frequencies above 100–200 kHz due to the dominant contribution of inductance in long connecting conductors (50 m and longer). A parallel grounding model is proposed, combining a local technological ground electrode located near the protected equipment (short 1 m conductor) with a remote protective ground. The frequency dependence of the equivalent impedance magnitude is derived analytically and evaluated numerically. Calculations reveal that even with a relatively high local grounding resistance (up to 500  $\Omega$ ), its presence reduces the system impedance at 1 MHz by approximately 17 % compared to using only the remote ground. When the local grounding resistance is lowered to 10  $\Omega$ , the equivalent impedance decreases by up to 96 %, significantly enhancing the noise immunity of microprocessor devices and CNC systems.

A comparative analysis of typical grounding configurations in high-resistivity soil ( $\rho = 1000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ) is performed for single and grouped vertical rods as well as plate electrodes. Plate electrodes are found to offer the best performance in achieving minimal resistance under spatial constraints. The selection of a grounding configuration should be based on its effectiveness and site-specific limitations typical of industrial environments.

The obtained results confirm the critical importance of local technological grounding as a key measure for improving EMC of industrial equipment and can be applied in the design and retrofitting of grounding systems in production facilities.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, grounding, switching overvoltages, CNC, high-frequency interference

**For citation:** Polyakov V. V. Effectiveness of grounding systems in ensuring electromagnetic compatibility of microprocessor equipment in industrial facilities. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 1(54): 11–24. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-11-24.

**Information about the author:**

**Valeriy V. Polyakov** – postgraduate, senior lecturer of Department of Operation Management of Siberian Transport University

orcid: 0009-0002-9813-0585

e-mail: polyanovvv@mail.ru

### Введение

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) микроэлектронных и микропроцессорных устройств приобретает актуальность по мере массового перехода к цифровым устройствам в производственных энергосистемах. В связи с этим решения при проектировании промышленных объектов требуют проработки вопросов ЭМС инженерных систем.

На текущий момент высокочастотные электромагнитные помехи необходимо рассматривать не только в цепях связи и промышленной автоматики, но и в системах электропитания. Согласно статистике японских производителей, коммутационные перенапряжения являются второй причиной по числу сбоев цифровых устройств релейной защиты (17 % случаев) после грозových разрядов (50 % случаев) [1]. При этом наиболее часто повреждаются печатные платы – до 80 % всех зарегистрированных сбоев. Основным источником помех оказываются подстанции с элегазовым оборудованием, где частоты коммутационных импульсов достигают 5–80 МГц при амплитудах до 600 В. Аналогичная картина наблюдается и в российской электроэнергетике, где фиксируется неправильная работа микропроцессорных устройств по причинам, связанным с электромагнитной совместимостью. Характерные примеры включают многочисленные ложные срабатывания и сбои микропроцессорных устройств на подстанциях. Так, при вводе защит Siemens зафиксировано более 400 ложных информационных сигналов за несколько месяцев, вызванных коммутационными помехами, грозowymi разрядами, работой сварочного оборудования и других источников [2; 3].

При эксплуатации станков с ЧПУ одной из ключевых проблем становится обеспечение ЭМС цифровой электроники. Авторы исследования [4] отмечают, что в таких станках характерны очень высокие уровни промышленных помех – класс 4 («очень сильное излучение») и даже класс X («экстремальный уровень») по классификации электромагнитной обстановки ГОСТ Р 51317.2.5-2000. Основные источники помех: асинхронные двигатели, частотные преобразователи, силовые кабели, коммутационные процессы, электромагнитные поля промышленной частоты и импульсные магнитные поля. Спектральный состав характеризуется наличием как низких частот от 50 Гц, так и наносекундных импульсов при переходных

процессах коммутации. Авторы приводят типичные последствия воздействия различных видов электромагнитных помех на цифровую аппаратуру управления, среди которых:

- перегорание входных цепей и интерфейсных элементов (при воздействии наносекундных импульсов);

- ложные срабатывания, «зависания», перезагрузки и невозможные повреждения КМОП-схем (при воздействии наносекундных импульсов);

- накопление ошибок и сбои (при воздействии магнитных полей промышленной частоты).

Выбор диапазона частот 50 Гц – 1 МГц для оценки эквивалентного импеданса заземляющих устройств в данном исследовании обусловлен основными видами электромагнитных помех, характерных для промышленных электроустановок и систем релейной защиты. На нижней границе (50 Гц) рассматривается промышленная частота сети электроснабжения как доминирующий источник кондуктивных и индуктивных помех электропитания оборудования [5]. Именно на этой частоте определяются стационарные режимы растекания тока и нормативные требования к сопротивлению заземления [6; 7]. В то же время, на частотах от десятков кГц до 1 МГц наиболее опасны переходные процессы коммутационных перенапряжений, импульсные помехи от работы высоковольтных выключателей, разъединителей и вакуумных/элегазовых аппаратов, а также наводки от грозových разрядов и коротких замыканий [8]. В указанном диапазоне происходит резкий рост вклада индуктивности соединительных проводников, что приводит к значительному увеличению модуля импеданса при использовании удаленных заземлителей. В текущих исследованиях подчеркивается, что помехи в диапазоне 100 кГц – 1 МГц (а в реальных условиях до нескольких МГц) относятся к наиболее критичным для микропроцессорной аппаратуры и систем автоматизации [9; 10]. Испытания устройств защиты нормируются наносекундными (5/50 нс) и наносекундными (1/50 мкс) импульсами, фронты и спектры которых лежат в пределах от 100 кГц до 1–2 МГц. При этом на частотах выше 1 МГц возрастает вклад емкостных связей, а индуктивность коротких соединительных проводников (1–2 м) уже не является лимитирующим фактором, в связи с чем верхняя граница расчетного диапазона принята на уровне 1 МГц [8; 10]. Такой выбор позволяет

охватить как нормативно значимые низкочастотные режимы (50 Гц), так и наиболее опасную зону высокочастотных коммутационных и импульсных воздействий, где проявляется определяющая роль локального низкоиндуктивного технологического заземления.

Эффективность применяемых мер электромагнитной защиты (экранирование кабелей, LC-фильтры, варисторы, TVS-диоды, ферритовые кольца и т. д.) в значительной степени определяется качеством функционирования системы заземления [11–13]. В работе [15] подчеркивается роль экспериментального проектирования заземления, включая использование вертикальных стержневых электродов для достижения оптимального сопротивления. В контексте промышленных объектов, где ограничено пространство для размещения заземлителей, проектирование должно учитывать не только стационарное сопротивление на 50 Гц, но и высокочастотные характеристики, поскольку в спектре импульсных помех (от коммутации или молний) усиливается вклад индуктивной составляющей. В исследовании [16], с использованием полноволнового метода конечных элементов, проанализирована частотная зависимость комплексного импеданса полусферических электродов, погруженных в грунт. Результаты моделирования показывают, что на низких частотах импеданс может проявлять индуктивный или емкостный характер с несколькими резонансными переходами, в то время как на высоких частотах, он стремится к чисто резистивному поведению.

Изменения свойств грунта вызывают многократные (до 3–7 раз) колебания сопротивления заземлителя, при этом импульсное сопротивление, критичное для защиты от помех, демонстрирует еще более выраженную зависимость от параметров грунта и климатических факторов [17]. Кроме того, поведение заземляющих электродов под воздействием молниевых ударов в значительной степени определяется частотно-зависимыми свойствами почвы, ее слоистостью и процессом ионизации вокруг электрода. Анализ частотно-зависимого комплексного импеданса заземляющих устройств в диапазоне от постоянного тока до нескольких МГц остается актуальной задачей при проектировании систем заземления 10 кГц – 5 МГц. В работе [18] проведена оценка вклада индуктивной и емкостной составляющих импеданса в реальных условиях ограниченного пространства и многослойного грунта.

Авторами исследования [19] проведено моделирование вертикальных и горизонтальных электродов длиной 6 м в однородных и двухслойных грунтах с удельным сопротивлением от 500 до 2000 Ом·м. Установлено, что при снижении частоты импульса (от 1 МГц до 0,1 кГц) и росте удельного сопротивления грунта эффективный радиус электрода за счет ионизации существенно увеличивается, что приводит к снижению импульсного импеданса и потенциала на поверхности земли. Наиболее критичными являются грунты с высоким удельным сопротивлением ( $\rho > 1000\text{--}2000$  Ом·м), где импульсный импеданс резко возрастает. Авторы подчеркивают, что традиционные модели без учета частотной зависимости удельного сопротивления грунта, дают значительные ошибки (до 30–50 % по импедансу), что особенно актуально в регионах с высоким удельным сопротивлением грунта.

Таким образом, настоящее исследование совмещает в себе теоретический анализ частотной зависимости импеданса систем заземления и оценочный расчет различных конфигураций заземлителей. Это создает теоретическое обоснование к применению локальных технологических заземлений в существующих системах заземления для обеспечения ЭМС оборудования с цифровыми модулями и ЧПУ на промышленных объектах.

#### Методы

В настоящей работе рассматривается упрощенная эквивалентная схема цепи заземления, отражающая реальную топологию подключения оборудования к системе заземления на промышленных объектах. На рис. 1 приведена схема замещения для моделирования, которая включает два устройства заземления и соединительные проводники между ними и оборудованием, что позволяет учесть конфигурацию с несколькими точками заземления и устройством защитного и технологического заземления (например, локальное заземление шкафа автоматики и основное контурное заземление цеха).

Для анализа эффективности заземления в условиях электромагнитных помех и коммутационных перенапряжений в диапазоне частот 50 Гц – 1 МГц традиционного подхода, учитывающего только активное сопротивление цепи заземления на промышленной частоте, недостаточно. С повышением частоты индуктивная составляющая импеданса проводников и, в меньшей степени, самих электродов становится доминирующей, что существенно увеличивает полное сопротивление цепи стекания тока помехи.

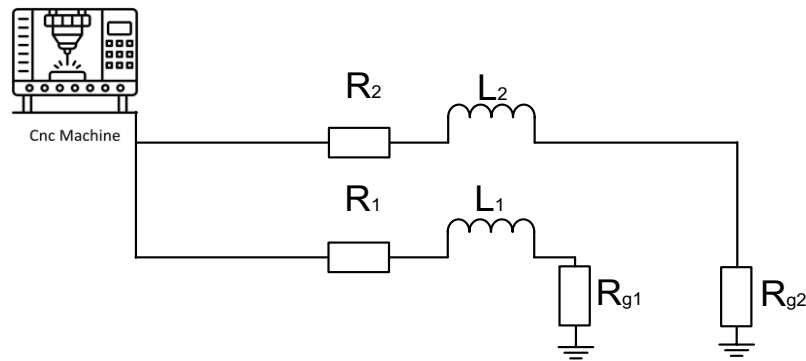


Рис. 1. Схема замещения цепи заземления оборудования

В качестве ограничений расчетной модели предполагается, что емкостная составляющая импеданса заземлителей и проводников в рассматриваемом диапазоне частот (до 1 МГц) пренебрежимо мала по сравнению с индуктивной и активной, а также, что удельное сопротивление грунта и заземлителей не зависит от частоты.

Полный эквивалентный импеданс всей системы заземления  $Z(\omega)$  определяется как импе-

данс двух параллельных комплексных сопротивлений:

$$Z(\omega) = \frac{(R_{\text{ЭКВ1}} + j\omega L_1) \cdot (R_{\text{ЭКВ2}} + j\omega L_2)}{(R_{\text{ЭКВ1}} + j\omega L_1) + (R_{\text{ЭКВ2}} + j\omega L_2)}, \quad (1)$$

где  $R_{\text{ЭКВ1}}$  и  $R_{\text{ЭКВ2}}$  – сумма активного сопротивления для контура технологического и защитного заземления соответственно.

Итоговая формула в комплексной форме после раскрытия числителя и знаменателя:

$$Z(\omega) = \frac{(R_1 + R_{g1})(R_2 + R_{g2}) - \omega^2 L_1 L_2 + j\omega \cdot ((R_1 + R_{g1})L_2 + (R_2 + R_{g2})L_1)}{(R_1 + R_{g1} + R_2 + R_{g2}) + j\omega(L_1 + L_2)}, \quad (2)$$

где  $R_1$  и  $L_1$  – параметры заземляющего проводника от зажима защищаемого оборудования до контура технологического заземления;  $R_2$  и  $L_2$  – параметры заземляющего проводника от зажима защищаемого оборудования до контура защитного заземления;  $R_{g1}$  – сопротивление растекания тока устройства технологического заземления;  $R_{g2}$  – сопротивление растекания тока устройства защитного заземления.

Индуктивность электродов заземления в данном исследовании не учитывается, поскольку доминирует индуктивность проводников.

Модуль импеданса как основной показатель эффективности заземления на выбранной частоте определяется согласно выражению:

$$|Z(\omega)| = \sqrt{\text{Re}(Z(\omega)^2) + \text{Im}(Z(\omega)^2)} \quad (3)$$

Аналитические выражения (2), (3) позволяют количественно оценить частотную зависимость полного эквивалентного импеданса системы заземления в диапазоне 50 Гц – 1 МГц с учетом реальной длины и индуктивности соединительных проводников, а также сопротивлений растекания двух независимых контуров –

технологического (локального) и защитного (основного).

Для оценки эффективности различных схем устройства заземления в ограниченных пространственных условиях цеха были выбраны типовые конфигурации, рекомендованные нормативной литературой и практикой проектирования. Расчеты сопротивления растеканию тока выполнены по известным аналитическим выражениям [20; 21] с учетом удельного сопротивления грунта  $\rho = 1000$  Ом·м на основании усредненных данных измерений на территории промышленных площадок.

В качестве ограничений моделирования приняты реалистичные условия производственного цеха:

- глубина заложения горизонтальных элементов – 0,5 м (под полом цеха);
- вертикальные стержни приняты длиной до 3 м (с учетом ограничений по заглублению при содержании пород разных фракций и строительного мусора в пятне застройки цеха);
- коэффициент промерзания принят 1, поскольку размещение внутри цеха под полом без промерзания и воздействия солнечных лучей и температуры засухи, испарения и т. д.

Сопротивление одиночного вертикального электрода с учетом климатического коэффициента сезонности сопротивления грунта определяется согласно выражению:

$$R_B = k_1 \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{d} + 0,5 \ln \frac{4t+L}{4t-L} \right), \text{ Ом}, \quad (4)$$

где  $k_1$  – коэффициент промерзания, учитывающий сезонные колебания температуры грунта;  $L$  – длина электрода, м;  $\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом·м;  $t$  – расстояние от поверхности земли до середины электрода, м;  $d$  – диаметр электрода, м.

Сопротивление растеканию тока в случае окружения заземлителя грунтом с другим удельным сопротивлением определяется по формуле:

$$R_3 = \frac{1}{2\pi L} \left( \rho_n \ln \frac{2L}{r_0} + 0,5(\rho - \rho_n) \ln \frac{\sqrt{L^2 + r^2} + L}{\sqrt{L^2 + r^2} - L} \right), \text{ Ом} \quad (5)$$

где  $\rho_n$  – удельное сопротивление грунта-заполнителя;  $r_0$  – радиус стержня заземлителя, м;  $r$  – радиус выемки котлована, м.

Сопротивление заземления пластинчатого заземлителя, заложеного на глубину  $h$  определяется по формуле:

$$R_{\Pi} = k_2 \frac{\rho}{4\pi D} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{3h} \right), \text{ Ом} \quad (6)$$

где  $D$  – диаметр (эквивалентный) пластины, м.

Упрощения, принятые в модели (пренебрежение емкостной составляющей и частотной зависимостью удельного сопротивления грунта), обоснованы тем, что в указанном диапазоне частот и при типичных длинах проводников на промышленных объектах (до 100 м) именно индуктивность линий вносит определяющий вклад в рост модуля импеданса.

### Результаты

#### Оценка частотной зависимости импеданса цепи заземления

Для анализа частотных характеристик системы заземления применена модель параллельного соединения двух путей стекания тока помехи. Первое устройство заземления – защитное, установленное вблизи вводно-распределительного устройства на расстоянии 50 м от оборудования. Сопротивление растекания для данного заземления нормируется Правилами устройства электроустановок потребителей, и для промышленных цехов с сетями 0,4 кВ может составлять от 4 до 40 Ом в зависимости от удельного сопротивления грунта. Второе устройство заземления – технологическое, предназначенное для обеспечения ЭМС, соединенное с оборудованием проводником длиной 1 м. В качестве заземляющих проводников использованы отрезки кабеля 1x16 мм<sup>2</sup>, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры заземляющего проводника для численного моделирования

Наименование параметра	Значение
Погонное активное сопротивление заземляющего проводника	1,21 мОм/м
Погонная индуктивность заземляющего проводника	1,0 мкГн/м

На рис. 2 (а, б) приведены результаты расчета модуля полного сопротивления  $|Z(f)|$  цепи заземления оборудования в спектре частот при значении сопротивления защитного заземления 4 Ом и 40 Ом (установленного в грунте с удельным сопротивлением 1000 Ом·м).

На низких частотах (до 10–20 кГц) во всех рассмотренных случаях эквивалентный импеданс близок к значению параллельного соединения сопротивлений заземления  $R_{g1}$  и  $R_{g2}$ . На частотах 100 кГц – 1 МГц наблюдается заметный рост  $|Z(f)|$ , при этом величина роста существенно зависит от сопротивления локального заземлителя  $R_{g1}$ .

Сравнение импеданса  $|Z(f)|$  при сопротив-

лении удаленного заземлителя  $R_{g2} = 4$  Ом и  $R_{g2} = 40$  Ом показывает, что на частотах до 10–20 кГц разница между этими двумя случаями значительна, и определяется в основном параллельным соединением сопротивлений  $R_{g1}$  и  $R_{g2}$ . При  $R_{g2} = 4$  Ом значения  $|Z(f)|$  на промышленной частоте и низких частотах в 2–5 раз ниже, чем при  $R_{g2} = 40$  Ом. На частотах 100 кГц и выше различия между  $R_{g2} = 4$  Ом и  $R_{g2} = 40$  Ом быстро сокращаются, и на 500 кГц – 1 МГц становятся минимальными или отсутствуют. Так, при  $R_{g1} = 10$  Ом на 1 МГц значения  $|Z(f)|$  составляют 11,57 Ом при  $R_{g2} = 4$  Ом и 11,53 Ом при  $R_{g2} = 40$  Ом. Относительная разница не превышает 1–2 %.

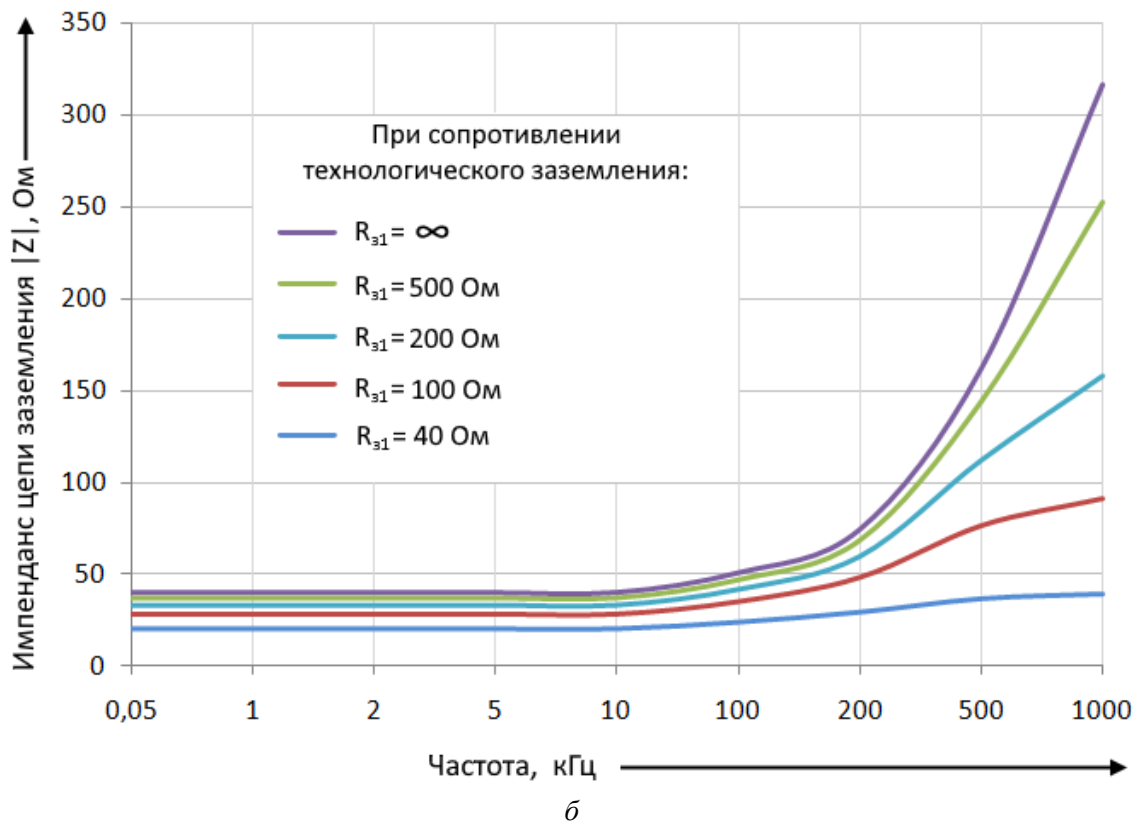
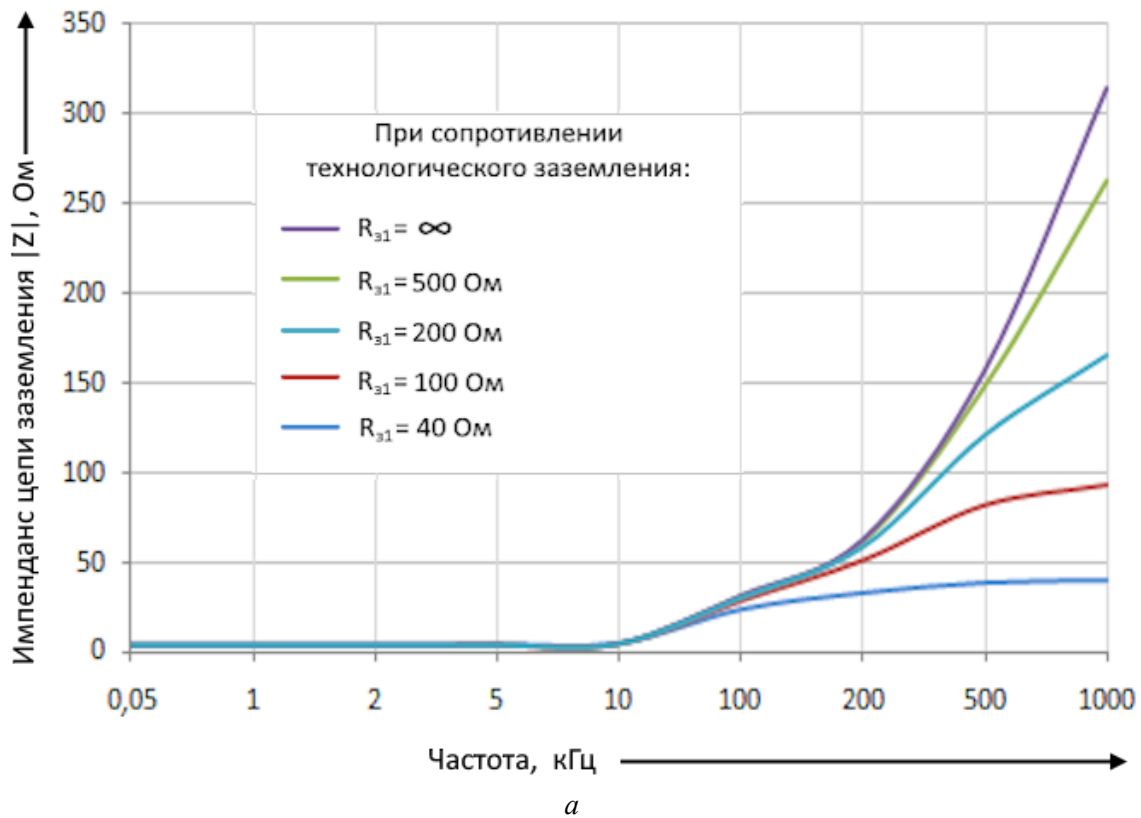


Рис. 2. Импеданс системы заземления в спектре частот при сопротивлении защитного заземления:  
*a* – 4 Ом; *б* – 40 Ом

В диапазоне 200 кГц – 1 МГц, характерном для электромагнитных помех и коммутационных перенапряжений, величина сопротивления удаленного заземлителя (4 Ом или 40 Ом) практически не влияет на эквивалентный импеданс системы. Основное значение имеет сопротивление локального заземлителя  $R_{g1}$  и низкая индуктивность короткого соединительного проводника (1 м).

В табл. 2 представлены значения модуля эквивалентного импеданса  $|Z|$  на частоте 1 МГц для параллельной схемы заземления при фиксированном сопротивлении защитного заземлителя  $R_{g2} = 40$  Ом и  $R_{g2} = 4$  Ом с различными значениями сопротивления локального (технологического) заземлителя  $R_{g2}$  от 10 Ом до 500 Ом. Также приведен предельный случай отсутствия локального заземления.

Таблица 2

Модуль эквивалентного импеданса  $|Z|$  на частоте 1 МГц

Импеданс на частоте 1 МГц		Сопротивление технологического заземления, Ом					
		отсутствует	500	200	100	30	10
Сопротивление защитного заземления, Ом	40 Ом	316,70	263,03	165,49	93,44	29,89	11,57
	4 Ом	314,19	252,18	158,28	90,74	29,6	11,53

Полученные результаты показывают, что на частоте 1 МГц наличие локального технологического заземления даже с относительно высоким сопротивлением  $R_{g1} = 500$  Ом позволяет снизить эквивалентный импеданс системы до 252–263 Ом вместо 314–317 Ом в случае полного отсутствия локального заземления (снижение на 15–17 %). При улучшении технологического заземления (уменьшении  $R_{g1}$ ) импеданс продолжает заметно снижаться до 11,5–11,6 Ом при сопротивлении технологического заземления  $R_{g1} = 10$  Ом.

При этом влияние сопротивления удаленного защитного заземлителя (4 Ом или 40 Ом) на частоте 1 МГц оказывается минимальным (менее 2–5 % во всех случаях), что подтверждает определяющую роль именно локального технологического заземления и низкой индуктивности короткого соединительного проводника в высокочастотной области.

В реальных условиях производственных цехов возможности размещения технологических заземлителей ограничены местными условиями, наличием бетонных полов, прохождением подземных коммуникаций и другими факторами. Поэтому возникает необходимость сравнительного анализа известных конфигураций заземлителей с целью определения наилучшего сочетания наименьшего сопротивления расте-

канию тока и реализуемости в типичных ограничениях промышленного объекта.

#### Оценка эффективности конфигураций технологического заземления

Далее приведены результаты расчета сопротивления заземляющих устройств для различных конфигураций и сравнение их с точки зрения достижимого уровня  $R_{g1}$  и технологической реализуемости. Для площадки со значением кажущегося удельного электрического сопротивления грунта 1 кОм·м рассчитаны сопротивления растеканию предложенных конфигураций заземляющих устройств. На рис. 3 приведен расчетный график зависимости  $R_{g1}$  от диаметра одиночного вертикального электрода длиной 3 м.

Применение вертикальных электродов диаметром менее 16 мм ограничено требованиями к механической и коррозионной стойкости. С другой стороны, прирост эффективности от применения диаметров выше 16 мм незначителен (при увеличении диаметра с d16 до d18 сопротивление  $R_{g1}$  снижается на 1,9 %).

Снижение сопротивления растекания может быть достигнуто увеличением длины электрода. На рис. 4 приведен расчетный график зависимости  $R_{g1}$  от длины одиночного вертикального электрода диаметром 16 мм.

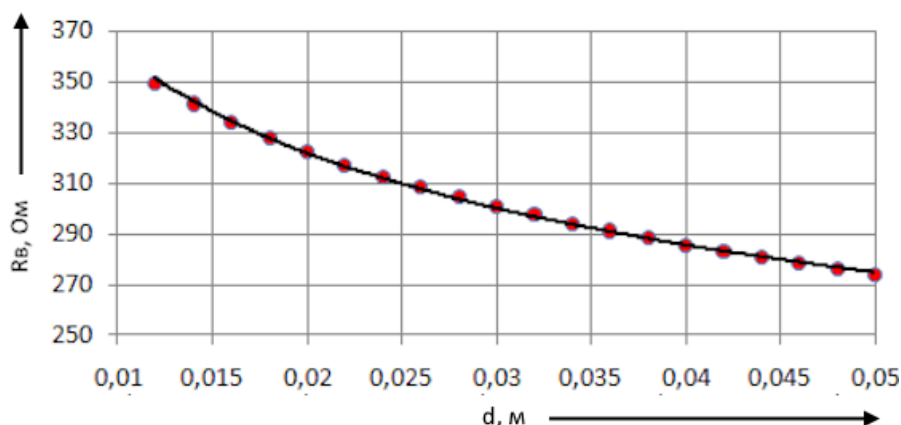


Рис. 3. График зависимости сопротивления от диаметра вертикального электрода

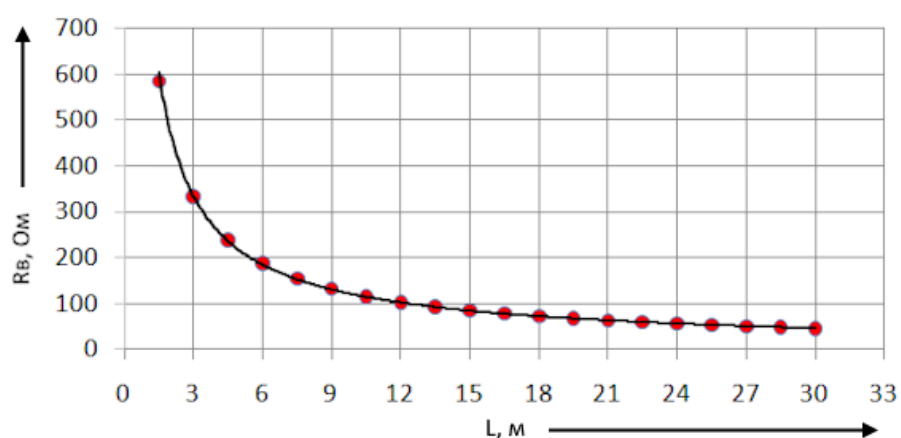


Рис. 4. График зависимости сопротивления от длины вертикального электрода

Заглубление электродов на 3 м и более может оказаться невыполнимо на ряде типов грунтов. При этом применение электродов длиной менее 3 м резко снижает эффективность заземлителя и требует мероприятий по снижению сопротивления растеканию тока. В связи с этим, в качестве мероприятий, возможно рассмотреть замещение грунта вблизи электрода.

Выбор размеров котлована и типа грунта-заполнителя осуществляется исходя из технической возможности проведения земляных работ и доступности грунта с низким удельным сопротивлением. В табл. 3 приведены результаты расчета сопротивления растеканию для вертикального заземлителя, размещенного в цилиндре радиусом 0,05 м грунта замещения.

Таблица 3

Результаты расчета сопротивления вертикального заземлителя в грунте замещения

Конфигурация заземления	Сопротивление $R_{gl}$ (Ом) при длине электрода		
	1 м	2 м	3 м
Без активации грунта	805	465	334
В грунте замещения (глина $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )	602	356	259
В грунте замещения (коксовая мелочь $\rho = 2,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ )	588	349	254

Результаты, приведенные в табл. 3, демонстрируют, что замена грунта в приэлектродной зоне на материал с более низким удельным сопротивлением позволяет снизить сопротивление растекания вертикального заземлителя на

25 % по сравнению с исходным грунтом. Максимальное относительное улучшение наблюдается при длине электрода 1 м. Эффект обусловлен увеличением эффективной площади контакта с проводящей средой. Сопоставимый ре-

зультат может быть получен при увеличении поверхности самого заземлителя, например, при использовании пластинчатых конструкций. Результаты расчета пластинчатого заземлителя по формуле (6) приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Результаты расчета пластинчатого заземлителя

Сопротивление растеканию $R_{г1}$ , Ом	Эквивалентный диаметр пластины, м
64	0,8
45	1,0
32	1,1
23	1,3
15	1,4

$$n = \frac{R_{г1}}{\eta R_{и}} \quad (7)$$

где  $R_{и}$  – необходимое сопротивление растеканию одного вертикального электрода;  $\eta$  – коэффициент использования (для оценки принят 0,33 для вертикальных стержней и 0,25 – для пластинчатых заземлителей).

На рис. 5 приведен график зависимости количества параллельно соединенных одиночных электродов от требуемого сопротивления заземляющего устройства.

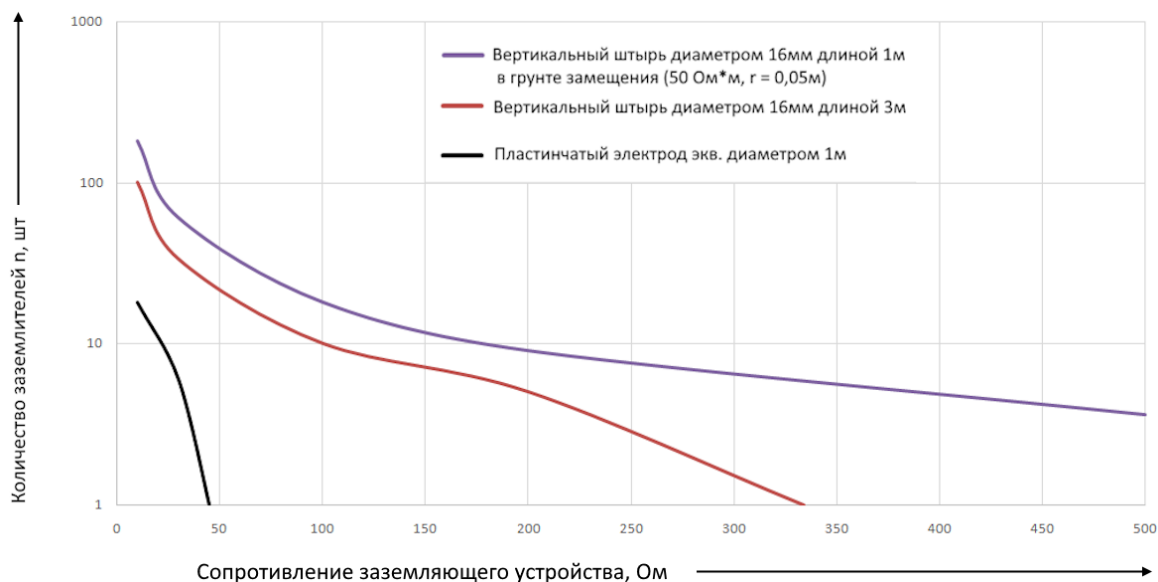


Рис. 5. График зависимости количества электродов от сопротивления заземляющего устройства

Нелинейный характер зависимости обусловлен снижением коэффициента использования при увеличении числа электродов: взаимное экранирование приводит к тому, что добавление каждого последующего электрода дает все меньший прирост эффективности. Наиболее выраженное снижение сопротивления наблюдается в области малого количества заземлителей  $n$  (от 1 до 10–20 шт.). Так, при переходе от одного стержня длиной 3м к группе из 10 шт. в естественном грунте сопротивление уменьшается примерно в 3 раза (с 334 до 100 Ом), а при дальнейшем увеличении  $n$  до 100–200 шт. прирост эффективности снижается. Аналогичная зависимость характерна и для электродов в грунте замещения. Наиболее эффективным

с точки зрения достижения низкого сопротивления при ограниченном числе элементов оказывается пластинчатый заземлитель: при  $n = 1$  сопротивление составляет всего 45 Ом, а при  $n = 18$  достигается значение 7 Ом. Это может сделать пластинчатые конструкции предпочтительными в условиях, когда требуется минимальное сопротивление при минимальном количестве элементов и ограниченной площади.

## Обсуждение

Полученные зависимости показывают, что в диапазоне частот электромагнитных помех и коммутационных перенапряжений (100 кГц – 1 МГц) определяющее влияние на эквивалентный импеданс оказывает наличие и качество

во локального технологического заземления с минимальной длиной соединительного проводника. Даже при относительно высоком сопротивлении технологического заземления (до 500 Ом) его присутствие уже обеспечивает заметное снижение импеданса на высоких частотах по сравнению с использованием исключительно системы защитного заземления. А при достижении сопротивления технологического заземления  $R_{g1} = 10$  Ом, импеданс системы снижается на 96 %.

Результаты исследования согласуются с японским опытом эксплуатации цифровых реле [1], где именно высокочастотные коммутационные импульсы (до 80 МГц) оказались наиболее критичными, а традиционные меры с использованием удаленного защитного заземления оказались недостаточными. В связи с этим ключевым решением для эффективной канализации токов помех от защищаемого устройства является минимизация импеданса, что достигается минимальной длиной проводников к технологическому заземлителю.

Полученные в работе результаты моделирования частотной зависимости импеданса параллельного заземления согласуются с выводами о критичности высокочастотных помех при модернизации промышленного оборудования [4]. Для минимизации рисков повреждения блоков ЧПУ предлагается комплекс технических мер: применение экранированных кабелей, ферритовых колец на сигнальных линиях, установка LC-фильтров и качественное низкоиндуктивное заземление по кратчайшему пути. Все перечисленные меры направлены не на частичное ослабление помех, а на обеспечение выполнения полного функционала оборудования в реальных условиях цеха (критерий А по устойчивости).

Частотные зависимости импеданса заземляющих устройств коррелируют с экспериментальными данными по измерению сопротивления в [15], где стержневые электроды различных конфигураций показали значения от 56,4 Ом до 358 Ом. Это подтверждает, что в стесненных условиях промышленных цехов (аналогично экспериментам на кампусе) комбинированные конфигурации с материалами, удерживающими влагу, обеспечивают лучшее растекание тока, снижая риск сбоев от импульсных помех. В высокочастотном диапазоне (100 кГц – 1 МГц) необходимы такие конструкции, которые минимизируют индуктивный вклад, дополняя локальное технологическое заземление, как пока-

зано в исследовании. При этом в зависимости от места установки заземлителя стоит учитывать свойства грунта и наличие сезонных колебаний для корректировки расчетов в реальных условиях эксплуатации. В частности, в работе [19] показано, что увеличение фронта волны (8–16 мкс) приводит к небольшому росту импульсного импеданса за счет частичной деионизации почвы. Критическая длина электрода, при которой дальнейшее удлинение не снижает импеданс, сильно зависит от ионизации и конфигурации: для вертикальных стержней она короче и стабильнее, для горизонтальных больше и чувствительнее к условиям промерзания и осушения грунта.

Применение локального замещения грунта, предложенное в исследовании позволяет снизить исходное сопротивление при применении одиночного короткого стержня на 25 %, однако требует дополнительных земляных работ. В ряде случаев, например, невозможность заглубления электрода 3 м или изъятия грунта для пластинчатого электрода, такое решение может быть обосновано. Групповые стержневые заземлители обеспечивают сопротивление 10–30 Ом даже в грунте с высоким удельным сопротивлением. Однако их применение в условиях эксплуатируемого объекта может быть связано с высокой трудоемкостью монтажа, значительным расходом металла и большой занимаемой площадью. Наиболее технологичным и экономически оправданным решением в большинстве случаев является использование пластинчатого заземлителя, которое позволяет достичь минимальных значений сопротивления от одиночного заземлителя. Такое решение дает наименьшее сопротивление при минимальном количестве элементов, но требует производства земляных работ, как правило, в стесненных условиях промышленных объектов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на экспериментальную проверку полученных зависимостей на реальных объектах, учет нелинейных эффектов ионизации грунта при импульсных воздействиях, а также на сравнительный анализ различных конструктивных способов снижения индуктивности соединительных цепей заземления в условиях промышленных объектов [22].

#### Заключение

Проведенное исследование показало, что в диапазоне частот 100 кГц – 1 МГц, наиболее критичном для микропроцессорной аппаратуры

релейной защиты и систем ЧПУ, определяющее влияние на эквивалентный импеданс системы заземления оказывает наличие и качество локального технологического заземлителя с минимальной длиной соединительного проводника. Даже при относительно высоком сопротивлении растекания такого заземлителя (до 500 Ом) его применение позволяет снизить модуль импеданса на частоте 1 МГц на 17 % по сравнению с использованием исключительно контура защитного заземления. При сопротивлении  $R_{г1} = 10$  Ом эквивалентный импеданс падает на 96 %, что повышает эффективность подавления коммутационных и импульсных помех.

Полученные результаты согласуются с данными натурных наблюдений [1; 4] и подтверждают, что традиционное опирание исключительно на общее защитное заземление цеха недостаточно для обеспечения электромагнитной совместимости современной цифровой аппаратуры. Для условий промышленных объектов выполнена оценка эффективности технических решений для технологического заземления в виде вертикальных и пластинчатых заземлителей.

Предложенная модель и полученные зависимости могут быть использованы при проектировании и реконструкции систем заземления производственных объектов, оснащенных чувствительной микропроцессорной техникой.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yamashita, K. Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment With High-Frequency Switching Surge in Japan / K. Yamashita, T. Tanaka // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, No. 1. – P. 88–93. – DOI: 10.1109/TPWRD.2005.852363.
2. Борисов, Р. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой // Новости электротехники. – 2001. – № 6(12).
3. Гуревич, В. И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 1 / В. И. Гуревич // Компоненты и технологии. – 2010. – № 2. – С. 60–64.
4. Антонов, А. Ю. Электромагнитная совместимость при модернизации станков с ЧПУ / А. Ю. Антонов, Д. П. Данилаев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 90–96. – DOI: 10.18469/1810-3189.2020.23.3.90-96.
5. Жумаев, О. А. Защита от помех технических средств автоматизации систем управления / О. А. Жумаев, М. Ф. Шермурадова, А. А. Бабаев // Наука, техника и образование. – 2018. – № 7(48). – С. 36–40. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-ot-pomeh-tehnicheskikh-sredstv-avtomatizatsii-sistem-upravleniya> (дата обращения: 29.01.2026). – Текст: электронный.
6. Розвадовский, А. Ф. Оценка электромагнитной совместимости высокочастотных индукционных систем в локальном объекте / А. Ф. Розвадовский, Ш. Шалилех // Вестник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, радіоапаратуобудування. – 2011. – № 45. – С. 81–87. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-elek-romagnitnoy-sovstestimosti-vysokochastotnyh-induktsionnyh-sistem-v-lokalnom-obekte> (дата обращения: 29.01.2026). – Текст: электронный.
7. Захаров, А. Защита промышленных приборов в соответствии с нормами по электромагнитной совместимости / А. Захаров // Компоненты и Технологии. – 2006. – № 58. – С. 124–129. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-promyshlennyh-pribo-rov-v-sootvetstvii-s-normami-po-elektromagnitnoy-sovstestimosti> (дата обращения: 29.01.2026). – Текст: электронный.
8. Уильямс, Дж. Минимизация прохождения помех от импульсного стабилизатора напряжения через линейный стабилизатор / Дж. Уильямс, Д. Иоффе // Компоненты и Технологии. – 2007. – № 67. – С. 102–108. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-prohozhdeniya-pomeh-ot-impulsnogo-stabilizatora-napryazheniya-che-rez-lineynuyu-stabilizator> (дата обращения: 29.01.2026). – Текст: электронный.
9. Коекин, В. А. Защита от помех управляющего и измерительного электрооборудования системы автоматизации жизнеобеспечения зданий / В. А. Коекин, В. А. Корчагин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2009. – № 3. – С. 68–73. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-ot-pomeh-upravlyayuschego-i-izmeritelnogo-elektro-oborudovaniya-sistemy-avtomatizatsii-zhizneobespecheniya-zdaniy> (дата обращения: 29.01.2026). – Текст: электронный.
10. Ромащенко, М. А. Методы топологической верификации обеспечения требований электромагнитной совместимости в конструкциях РЭС / М. А. Ромащенко // Вестник ВИ МВД России. – 2013. – № 4. – С. 94–99. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-topologicheskoy-verifikatsii-obespecheniya-trebovaniy-elektromagnitnoy-sovstestimosti-v-konstruktsiyah-res> (дата обращения: 29.01.2026). – Текст: электронный.
11. Зюзин, В. Д. Эффективные меры по обеспечению электромагнитной совместимости оборудования радиорелейной и оптической связи / В. Д. Зюзин, С. И. Платонов, М. С. Ладарев, А. Г. Остроумов, Г. Н. Трушин // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnye-mery-po-obespecheniyu-elektromagnitnoy-sovstestimosti-oborudovaniya-radioreleynoy-i-opticheskoy-svyazi> (дата обращения: 29.01.2026).
12. Геворкян, М. Фильтры подавления электромагнитных помех фирмы Epcos / М. Геворкян // Компоненты и Технологии. – 2001. – № 16. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/filtry-podavleniya-elektromagnitnyh-pomeh-firmy-epcos> (дата обращения: 29.01.2026).
13. Ромащенко, М. А. Конструкторско-технологические аспекты обеспечения ЭМС при разработке РЭС / М. А. Ромащенко // Вестник ВГТУ. – 2010. – № 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konstruktorsko-tehnologicheskie-aspekty-obespecheniya-ems-pri-razrabotke-res> (дата обращения: 29.01.2026).
14. ГОСТ 58882-2020. Совместимость технических средств электромагнитная. Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Технические требования и методы испытаний. – Введ. 2021-07-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – IV, 36 с.
15. Ada, Yustinus & Bajowawo, Maria & A, Sulaiman & Pabiban, Duma & Rochani, Rochani. (2025). Engineering Study Of Grounding Systems Through Experimental Methods On Down Rod Conductors. American Journal of Economic and Management Business (AJEMB). 4. 1725-1735. 10.58631/ajemb.v4i10.324.

16. *Brandao, Faria, Jose & Fernandes, João & Machado, Vitor & Pedro, Maria.* (2024). Frequency-Dependent Grounding Impedance of a Pair of Hemispherical Electrodes: Inductive or Capacitive Behavior?. *Energies*, 17, 3206. 10.3390/en17133206.

17. *Sikora, Roman & Wilk, Adrian & Markiewicz, Przemysław & Korzeniewska, Ewa.* (2025). Impact of seasons on industrial grounding resistance. *Scientific Reports*, 15, 10.1038/s41598-025-96702-3.

18. *Machado, Vitor & Fernandes, João & Pedro, Maria & Brandao Faria, Jose.* (2024). Numerical Evaluation of the Frequency-Dependent Impedance of Hemispherical Ground Electrodes through Finite Element Analysis. *Energies*, 17, 452. 10.3390/en17020452.

19. *Gouda, Osama & Omar, Sara & Lehtonen, Matti & Darwish, M. M. F..* (2024). Investigation of soil resistivity impacts on the electrodes of grounding system subjected to lightning strikes. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 18, n/a-n/a. 10.1049/gtd2.13287.

20. *Федоров, А. А.* Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / А. А. Федоров. – Издательство: Энергия ; Год выпуска: 1974.

21. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов, М.: Связь, 1971.

22. *Польянов, В. В.* Стандартизация электромагнитной совместимости // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 7. – С. 18–21. – EDN WDYZDR.

#### REFERENCES

1. *Yamashita, K.* Experience of Numerical Protective Relays Operating in an Environment With High-Frequency Switching Surge in Japan / K. Yamashita, T. Tanaka // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2006. – Vol. 21, No. 1. – P. 88–93. – DOI: 10.1109/TPWRD.2005.852363.

2. *Borisov, R.* Inattention to the EMC Problem Can Lead to a Catastrophe // *News of Electrical Engineering*. – 2001. – No. 6(12).

3. *Gurevich, V. I.* The Problem of Electromagnetic Impact on Microprocessor-Based Relay Protection Devices. Part 1 / V. I. Gurevich // *Components and Technologies*. – 2010. – No. 2. – P. 60–64.

4. *Antonov, A. Yu.* Electromagnetic Compatibility During the Modernization of CNC Machine Tools / A. Yu. Antonov, D. P. Danilaev // *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*. – 2020. – Vol. 23, No. 3. – P. 90–96. – DOI: 10.18469/1810-3189.2020.23.3.90-96.

5. *Zhumaev, O. A.* Protection of Automation Equipment from Interference in Control Systems [Electronic resource] / O. A. Zhumaev, M. F. Shermurodova, A. A. Babaev // *Science, Technology and Education*. – 2018. – No. 7(48). – P. 36–40. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-ot-pomeh-tehnicheskikh-sredstv-avtomatizatsii-sistem-upravleniya> (accessed: 29.01.2026).

6. *Rozvadovskiy, A. F.* Estimation of Electromagnetic Compatibility of High-Frequency Induction Systems in a Local Object [Electronic resource] / A. F. Rozvadovskiy, Sh. Shalileh // *Bulletin of NTUU "KPI". Series: Radio Engineering, Radio Apparatus Building*. – 2011. – No. 45. – P. 81–87. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-elektromagnitnoy-sovmestimosti-vysokochastotnyh-induktsionnyh-sistem-v-lokalnom-obekte> (accessed: 29.01.2026).

7. *Zakharov, A.* Protection of Industrial Instruments in Accordance with Electromagnetic Compatibility Standards [Electronic resource] / A. Zakharov // *Components and Tech-*

*nologies*. – 2006. – No. 58. – P. 124–129. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-promyshlennyh-priborov-v-sootvetstvii-s-normami-po-elektromagnitnoy-sovmestimosti> (accessed: 29.01.2026).

8. *Williams, J.* Minimizing the Passage of Interference from a Switching Voltage Regulator through a Linear Regulator [Electronic resource] / J. Williams, D. Ioffe // *Components and Technologies*. – 2007. – No. 67. – P. 102–108. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-prohozhdeniya-pomeh-ot-impulsnogo-stabilizatora-napryazheniya-cherez-lineynyy-stabilizator> (accessed: 29.01.2026).

9. *Koykin, V. A.* Protection of Control and Measuring Electrical Equipment of Building Life Support Automation Systems from Interference [Electronic resource] / V. A. Koykin, V. A. Korchagin // *Electrical and Information Complexes and Systems*. – 2009. – No. 3. – P. 68–73. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zaschita-ot-pomeh-upravlyayuschego-izmeritelnogo-elektrooborudovaniya-sistemy-avtomatizatsii-zhizneobespecheniya-zdaniy> (accessed: 29.01.2026).

10. *Romashchenko, M. A.* Methods of Topological Verification for Ensuring Electromagnetic Compatibility Requirements in RES Designs [Electronic resource] / M. A. Romashchenko // *Bulletin of the All-Russian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. – 2013. – No. 4. – P. 94–99. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-topologicheskoy-verifikatsii-obespecheniya-trebovaniy-elektromagnitnoy-sovmestimosti-v-konstruktsiyah-res> (accessed: 29.01.2026).

11. *Zyuzin, V. D., Platonov S. I., Ladarev M. S., Ostroumov A. G., Trushin G. N.* Effective Measures to Ensure Electromagnetic Compatibility of Radio Relay and Optical Communication Equipment // *Innovations and Investments*. – 2020. – No. 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnyemye-po-obespecheniyu-elektromagnitnoy-sovmestimosti-oborudovaniya-radioreynoy-i-opticheskoy-svyazi> (accessed: 29.01.2026).

12. *Gevorkyan, Mikhail.* Electromagnetic Interference Suppression Filters by Epcos // *Components and Technologies*. – 2001. – No. 16. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/filtry-podavleniya-elektromagnitnyh-pomeh-firmy-epcos> (accessed: 29.01.2026).

13. *Romashchenko, M. A.* Design and Technological Aspects of Ensuring EMC in RES Development // *Bulletin of VSTU*. – 2010. – No. 11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konstruktorsko-tehnologicheskie-aspekty-obespecheniya-ems-pri-razrabotke-res> (accessed: 29.01.2026).

14. GOST 58882-2020. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Low-Voltage Surge Protective Devices. Technical Requirements and Test Methods. – Enacted 2021-07-01. – М. : Standartinform, 2020. – IV, 36 p. (In Russ.).

15. *Ada, Y., Bajowawo, M., Sulaiman, A., Pabiban, D., & Rochani, R.* (2025). Engineering Study Of Grounding Systems Through Experimental Methods On Down Rod Conductors. *American Journal of Economic and Management Business (AJEMB)*, 4, 1725-1735. <https://doi.org/10.58631/ajemb.v4i10.324>.

16. *Brandao Faria, J., Fernandes, J., Machado, V., & Pedro, M.* (2024). Frequency-Dependent Grounding Impedance of a Pair of Hemispherical Electrodes: Inductive or Capacitive Behavior?. *Energies*, 17(13), 3206. <https://doi.org/10.3390/en17133206>.

17. *Sikora, R., Wilk, A., Markiewicz, P., & Korzeniewska, E.* (2025). Impact of seasons on industrial grounding resistance. *Scientific Reports*, 15, 2995. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96702-3>.

18. *Machado, V., Fernandes, J., Pedro, M., & Brandao Faria, J.* (2024). Numerical Evaluation of the Frequency-

Dependent Impedance of Hemispherical Ground Electrodes through Finite Element Analysis. *Energies*, 17(2), 452. <https://doi.org/10.3390/en17020452>.

19. *Gouda, O., Omar, S., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F.* (2024). Investigation of soil resistivity impacts on the electrodes of grounding system subjected to lightning strikes. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 18(20), 4078–4090. <https://doi.org/10.1049/gtd2.13287>.

20. *Fedorov, A. A.* (1974). Handbook on Power Supply for Industrial Enterprises. *Energiya*.

21. Guidelines for the Design, Construction and Operation of Grounding in Wire Communication Installations and Radio Broadcasting Nodes (1971). *Svyaz*.

22. *Polyanov, V. V.* Standardization of Electromagnetic Compatibility // Automation, Communications, Informatics. – 2016. – No. 7. – P. 18–21. – EDN WDYZDR.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026, доработана 09.02.2026, подписана в печать 13.02.2026

The article was submitted 30.01.2026, revised 09.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 533.9.082.5; 533.9.07; 621.3.022  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-24-30

Научная статья  
Original article

*А. Л. Суркаев*

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

Волжский политехнический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, Россия

✉ Анатолий Леонидович Суркаев, [alsurkaev@mail.ru](mailto:alsurkaev@mail.ru)

**Аннотация.** В работе представлены элементы информационно-измерительной системы (ИИС), предназначенной для исследования спектра электромагнитного излучения оптического диапазона, возбуждаемого электрическим взрывом проводников (ЭВП) в воздушной среде. В экспериментах использовались металлические проводники в виде цилиндрических проволочек из меди (Cu) и алюминия (Al). Спектр электромагнитного излучения фиксировался посредством оптического монохроматора и регистрировался фотоэлементом. Время существования металлической плазмы составляло  $\tau \approx 220 \div 280$  мкс. Оценка температуры металлической плазмы меди  $T_{Cu} \approx 56,31 \cdot 10^3$  °C и алюминия  $T_{Al} \approx 50,44 \cdot 10^3$  °C.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, электрический взрыв проводников, пояс Роговского, делитель напряжения, спектр излучения оптического диапазона, спектрометр

**Для цитирования:** Суркаев А. Л. Электромагнитное излучение оптического диапазона электрического взрыва проводников. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 24–30. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-24-30.

### Информация об авторе

**Анатолий Леонидович Суркаев** – д-р тех. наук, проф. каф. ВМФМ Волжского политехнического института (филиала) Волгоградского государственного технического университета  
e-mail: [alsurkaev@mail.ru](mailto:alsurkaev@mail.ru)

*A. L. Surkaev*

## ELECTROMAGNETIC RADIATION OF THE OPTICAL RANGE OF ELECTRIC EXPLOSION OF CONDUCTORS

Volzhsky Polytechnic Institute (branch)

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Anatoly L. Surkaev, [alsurkaev@mail.ru](mailto:alsurkaev@mail.ru)

**Abstract.** This paper presents elements of an information-measuring system (IMS) designed to study the spectrum of optical electromagnetic radiation generated by the electrical explosion of conductors (EEC) in air. The experiments utilized metallic conductors in the form of cylindrical copper (Cu) and aluminum (Al) wires. The electromagnetic radiation spectrum was recorded using an optical monochromator and a photocell. The lifetime of the metallic plasma was. The temperature of the metallic plasma of copper  $T_{Cu} \approx 56,31 \cdot 10^3$  °C and aluminum  $T_{Al} \approx 50,44 \cdot 10^3$  °C. was estimated.

**Keywords:** information-measuring system, electrical explosion of conductors, Rogowski coil, voltage divider, optical range radiation spectrum, spectrometer

**For citation:** Surkaev A. L. Electromagnetic radiation of the optical range of electric explosion of conductors. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 1(54): 24–30. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-24-30.

### Information about the author

**Anatoly L. Surkaev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mathematics and Mechanics, Volzhsky Polytechnic Institute (branch) Volgograd State Technical University  
e-mail: [alsurkaev@mail.ru](mailto:alsurkaev@mail.ru)

### Введение

Электрический взрыв проводников (ЭВП) [1] в современном мире находит широкое применение в фундаментальных научных исследованиях и решениях различных прикладных задач, в частности, как источник электромагнитного излучения низкотемпературной плазмы. Неотъемлемой составляющей протекания электрического взрыва являются высокие амплитудные значения плотности токов, сверхсильные магнитные и электрические поля, экстремальное состояние вещества проводников (высокие давления и температуры). Описание основных процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек в вакууме детально представлено коллективом авторов [2]. Исследование спектра широкого частотного диапазона плазменного излучения металлов представляется важным направлением в физических исследованиях. В работе [3] показаны результаты исследований спектра оптического и ультрафиолетового диапазона излучения сильноточных процессов электрического взрыва. Исследование временной динамики оптического излучения и спектрального состава ультрафиолетового и мягкого рентгеновского диапазона излучения электрического взрыва в режиме относительно малых токов разряда  $I \approx 1 \text{ кА}$  вольфрамовой проволочки рассмотрено авторами [4]. В результате проведенных экспериментов обнаружено наличие второго пика интенсивности свечения интегрального света длительностью  $\Delta\tau \approx 1 \text{ нс}$  при взрыве проволочки диаметром  $d = 100 \text{ мкм}$ .

Использование современных методов спектроскопии с применением спектрографа «Andor SR 750» авторами [5] проведены исследования спектров излучения электрического взрыва медной проволочки в диапазоне длин волн  $\lambda_{\text{Cu}} = 400 \div 500 \text{ нм}$ . На основе теории термодинамического равновесия по относительным интенсивностям линий рассчитана температура возбуждения дуговой плазмы взрывающейся медной проволочки, которая составляет приблизительно  $T \approx 5400 \text{ К}$ . В области противофазы существования импульсного разряда температура возбуждения заметно изменяется и относительно стабильна на более поздней его стадии. Разница температур возбуждения в течении протекания всего разряда находится в пределах  $T \approx 800 \text{ К}$ .

Результаты численных исследований [6] закономерностей электрического взрыва медных

проводников при протекании тока с плотностью  $j \approx 10^9 \text{ А/см}^2$  показывают, что максимум спектрального распределения энергии излучения для квазистационарного и радиочастотного диапазона, а также для длин волн ультрафиолетового и видимого спектра, лежит в области ультрафиолетового диапазона.

В результате экспериментальных исследований спектра оптического излучения электрических взрывающихся проводников, проводимых на экспериментальной установке [7], получены и проанализированы пространственно-временные характеристики протекания электровзрыва и спектр излучения плазмы для медных и танталовых проводников. Показано, что электрический взрыв медного проводника в основном характеризуется неоднородностью ионизации и быстрым расширением канала разряда. Спектр на ранней стадии разряда электрического взрыва медного провода был непрерывным, и большинство спектральных линий собственного излучения принадлежали Cu I или Cu II. На более поздней стадии процесса диссипации плазмы непрерывный спектр постепенно трансформировался в линейчатый. Таким образом, для получения более обширной и достоверной информации о спектральных особенностях электромагнитного излучения электрического взрыва различных металлических проводников требуются дальнейшие исследования, что определяет актуальность рассматриваемой задачи.

**Целью работы** является разработка основных элементов информационно-измерительной системы (ИИС), предназначенной для исследования параметров электромагнитного излучения оптического диапазона взрывающихся металлических проводников.

### Основные компоненты ИИС исследования спектра излучения

Основные составляющие элементы информационно-измерительной системы, предназначенной для исследования электрического взрыва проводников, и ее функциональные особенности являются традиционными [8]. Для исследования спектральных закономерностей электромагнитного излучения электрического взрыва металлических проводников использовалось дополнительное оптическое оборудование, позволяющее регистрировать спектр излучения. На рис. 1 представлена функциональная блок-схема информационно-измерительной системы. Высокое напряжение, вырабатываемое генера-

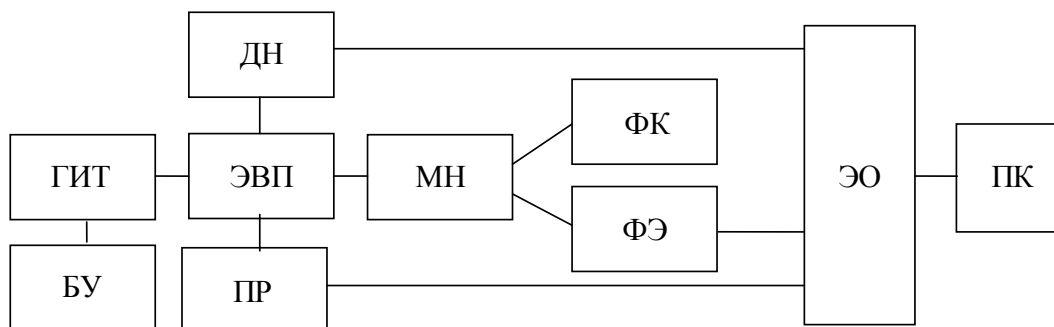


Рис. 1. Функциональная блок-схема:

блок управления: БУ; генератор импульсных токов – ГИТ; электрический взрывающийся проводник – ЭВП; пояс Роговского – ПР; делитель напряжения – ДН; спектрометр (монокроматор) – МН; фотокамера – ФК; фотоэлемент – ФЭ; электронный осциллограф – ЭО; персональный компьютер – ПК

тором импульсных токов (ГИТ), подается на электродную систему, в которой установлен взрывающийся проводник. При протекании по металлическому проводнику импульса тока большой плотности реализуется электрический взрыв последнего (ЭВП). Величина разрядного тока регистрируется поясом Роговского (ПР), напряжение на проводнике – делителем напряжения (ДН). Электрический взрыв проводника сопровождается формированием в окружающем пространстве ударной волны (УВ) и электромагнитным излучением (ЭИ) широкого частотного диапазона. Взрывающийся проводник расположен в диэлектрической колбе со смотровым окошком, геометрические размеры которого позволяло расположить большую часть изображения на поверхности катода фотоэлемента. Размеры щели смотрового окошка составили: длина  $l = 18 \text{ мм}$  и ширина  $h = 5 \text{ мм}$ . Мощная вспышка электромагнитного излучения, ограниченная смотровым окошком, попадает в объектив монохроматора (МН) – УМ-2, предназначенного для разложения интегрального электромагнитного излучения электрического взрыва проводника в спектр оптического диапазона. Спектр фиксируется фотокамерой (ФК) и фоторегистратором – фотоэлементом марки ЦГ – 4 (ФЭ). Электрические сигналы фиксируются цифровым запоминающим электронным осциллографом (ЭО). В экспериментах использован двухканальный запоминающий цифровой осциллограф марки GWINSTEK GDS-810S, имеющий оперативную связь с персональным компьютером (ПК). Накопителем электрической энергии, является [9] генератор импульсных токов (ГИТ) конденсаторного типа. Максимальное зарядное напряжение генератора импульсных токов  $U_0 = 3 \text{ кВ}$ , электрическая емкость  $C = 2200 \text{ мкФ}$  запасаемая энер-

гия  $W = 10 \text{ кДж}$ , период разряда короткого замыкания  $T \approx 800 \text{ мкс}$ , скорость нарастания тока  $dI/dt \gg 0,25 \text{ А/нс}$ .

#### Экспериментальные исследования и результаты

Для получения оценочной характеристики зависимости фототока используемого фотоэлемента (ФЭ) от мощности электромагнитного излучения использовались вольфрамовые лампочки накаливания. В экспериментах освещался в импульсном режиме фотоэлемент (ФЭ) излучением вольфрамовой нити различной электрической мощности  $N = 40 \div 200 \text{ Вт}$ . Конфигурация всей экспериментальной установки не менялась. Для этого использовалась система зеркал, посредством которой световой луч от излучателя направлялся на фотоэлемент, установленный в области расположения окуляра монохроматора. В качестве формирования короткого светового импульса использовался механический затвор, находящийся между смотровым окошком и объективом монохроматора. Электрический сигнал фотоэлемента фиксировался запоминающим осциллографом.



Рис. 2. Характерная осциллограмма электрического сигнала фотоэлемента от лампочки накаливания  $N = 40 \text{ Вт}$

На рис. 2 показана характерная осциллограмма импульса напряжения фотоэлемента, получаемая при облучении фотоэлемента излучением вольфрамовой нити накаливания. Время срабатывания механического затвора составляет  $\Delta t \approx 75 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Используя табличные справочные данные и методику оптической пирометрии, были определены значения температуры вольфрамовой нити накаливания для используемых излучателей. График интенсивности излучения (пропорциональная зависимость напряжению и, соответственно, фототоку) и температуры вольфрамовой нити от электрической мощности лампочек представлен на рис. 3.

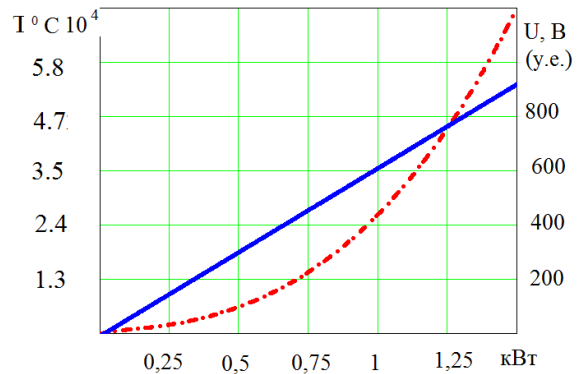


Рис. 3. График экстраполяции зависимости импульса фототока и температуры источника излучателей от электрической мощности

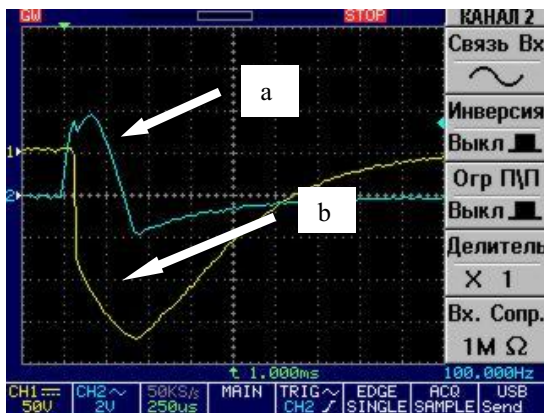


Рис. 4. Осциллограммы разрядного тока (a) и интенсивности излучения (b) ЭВП медной (Cu) проволоочки. Диаметр  $d_{Cu} = 0,3 \text{ мм}$  длина  $l_{Cu} = 50 \text{ мм}$ , зарядное напряжение  $U = 1,2 \text{ кВ}$

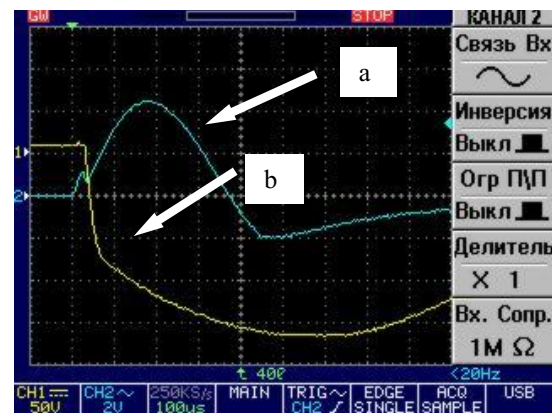


Рис. 5. Осциллограммы разрядного тока (a) и интенсивности излучения (b) ЭВП алюминиевой (Al) фольги. Толщина  $h_{Al} = 10 \text{ мкм}$ , длина  $l_{Al} = 70 \text{ мм}$ , зарядное напряжение  $U = 1,2 \text{ кВ}$

Следующим шагом в исследованиях являлись эксперименты по регистрации временной зависимости фототока (интенсивность излучения) электрического взрыва медной проволоочки и алюминиевой фольги, (рис. 4 и 5) соответственно, при равенстве начальных параметров энергетической установки. Полученные результаты показывают принципиальную разницу протекания электрического взрыва разных металлов при одинаковом начальном зарядном напряжении конденсаторного накопителя. На графиках отчетливо наблюдается наличие ярко выраженной паузы тока – момент собственно взрыва проводника. Разрушение проводника, нарушение металлической проводимости, образование плазмы электрического разряда по продуктам взрыва, что отчетливо демонстрирует наличие вертикального всплеска фототока в данный момент времени. При этом следует отметить, что интенсивности электромагнитного излучения при взрывах медных и алюмине-

вых металлов не имеют кардинальных различий. Несколько иная картина (рис. 6 и 7) наблюдается в том случае, когда электрический взрыв проводников протекает в условиях близкого к согласованному режиму [10; 11]. Применяя метода экстраполяции (рис. 3), можно произвести оценку мощности электромагнитного излучения и температуры металлической плазмы взрывающихся проводников.

Справедливость такого подхода можно обосновать, сравнивая критические температуры металлов, сопоставляя с критическими температурами вольфрамовых излучателей. Температура плавления меди  $T_{Cu} \approx 1083 \text{ }^\circ\text{C}$ , алюминия  $T_{Al} \approx 660 \text{ }^\circ\text{C}$ , вольфрама  $T_W \approx 3410 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура кипения меди  $T_{Cu} \approx 2567 \text{ }^\circ\text{C}$ , алюминия  $T_{Al} \approx 2467 \text{ }^\circ\text{C}$ , вольфрама  $T_W \approx 5930 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рабочая температура вольфрамовой лампочки накаливания лежит в пределах  $T_W = (2200 \div 3000) \text{ }^\circ\text{C}$ .

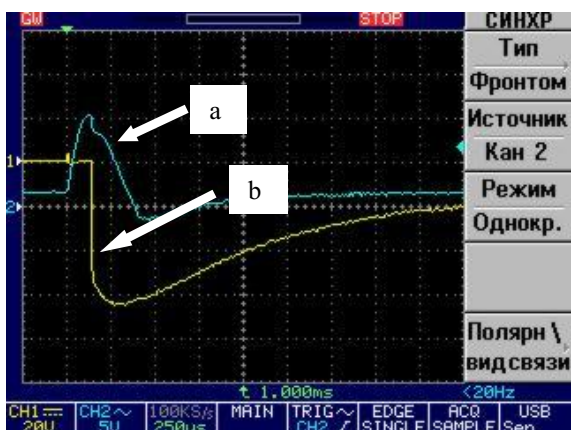


Рис. 6. Осциллограммы разрядного тока (a) и интенсивность излучения (b) ЭВП медной (Cu) проволочки. Диаметр  $d_{Cu} = 0,91$  мм длина  $l_{Cu} = 100$  мм, зарядное напряжение  $U = 2,2$  кВ

Результаты ряда исследований показывают, что яркостная температура излучающей плазмы при электрическом взрыве металлов [12] может достигать  $T \gg 60000$  °С. Интенсивность излучения – амплитудное значение регистрируемого электрического сигнала фотозлемента при электрическом взрыве медного (Cu) и алюминиевого (Al) проводника составило  $U_{Cu} \approx 640$  В и  $U_{Al} \approx 780$  В, соответственно. В первом приближении оценка температуры «металлической плазмы» (рис. 3) взрывающихся проводников (рис. 4 и 5), при условии равенства изначально запасенной энергии конденсаторного накопителя  $W \approx 1580$  Дж, составила  $T_{Cu} \approx 13,5 \cdot 10^3$  °С и  $T_{Al} \approx 14,5 \cdot 10^3$  °С. Полученный результат в достаточной мере согласуется с данными [13], согласно которым максимальная температура плазмы при детонации медного фольгового преобразователя  $T_{Cu} = 16280$  К.

Для оценки максимальной температуры  $T_{max}$  в «металлической плазме» при электрическом взрыве проводника воспользуемся законом Стефана – Больцмана:

$$T_{max} = (\sigma^{-1} R)^{\frac{1}{4}},$$

где  $R$  – энергетическая светимость;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> – постоянная Стефана – Больцмана. Следуя [14; 15], полагаем, что температура  $T_{max}$  определяется электронной температурой плазмы, которая, в свою очередь, определяется плотностью теплового потока  $G_m$  в поперечном сечении  $S_0$  проводника, представляющая собой энергетическую светимость. Максимальная плотность теплового потока  $G_m$

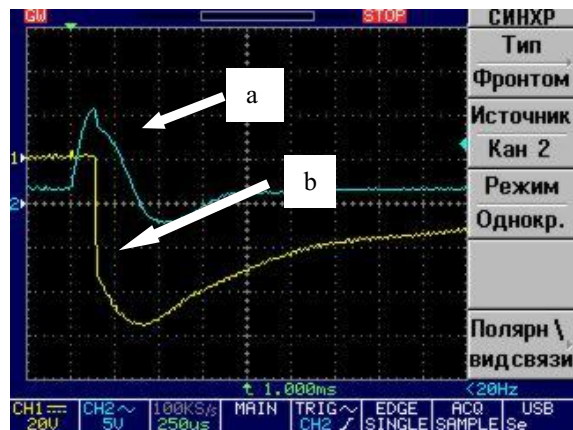


Рис. 7. Осциллограммы разрядного тока (a) и интенсивность излучения (b) ЭВП алюминиевой (Al) проволочки. Диаметр  $d_{Al} = 1,2$  мм, длина  $l_{Al} = 130$  мм, зарядное напряжение  $U = 2,2$  кВ

в «металлической плазме», образовавшейся при электрическом взрыве проводника, согласно [14], определяется следующим электрофизическим соотношением:

$$G_m = \delta_{mk} U_e,$$

где  $\delta_{mk} \approx I_{mk} / S_0$  – амплитуда критической плотности тока;  $I_{mk}$  – амплитуда протекающего по проводнику импульсного тока в момент его электрического взрыва;  $U_e \approx 10$  В – приэлектродное падение напряжения в краевых зонах сублимируемого проводника, численно не превышающее данного значения для основных металлов [16]. Амплитуда импульсного тока  $I_{mk}$  определяется в первом приближении соотношением:

$$I_{mk} \approx (2J_k S_0^2 I_m \omega)^{\frac{1}{3}},$$

где  $I_m$  – амплитуда разрядного тока,  $J_k = \int \delta_k^2(t) dt$  – интеграл действия тока;  $\omega$  – частота, определяемая электрическими параметрами разрядного контура. Тогда максимальная температура  $T_{max}$  в «металлической плазме»:

$$T_{max} \approx \left[ \sigma^{-1} U_e (2J_k S_0^{-1} I_m \omega)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

Используя представленное соотношение и результаты полученных экспериментальных исследований (рис. 6 и 7) определена температура металлической плазмы при электрическом взрыве медной проволочки и алюминиевой проволочки  $T_{Cu} \approx 56,31 \cdot 10^3$  °С и  $T_{Al} \approx 50,44 \cdot 10^3$  °С. Расчетные значения температуры металлической плазмы [15] тонкого медного проводника

составляет  $T_{Cu} \approx 92,67 \cdot 10^3 \text{ } ^\circ K$ , что является удовлетворительным согласованием с полученными результатами, при этом следует учитывать временную и количественную разность введенной в проводник энергии.

#### Заключение

Таким образом, в работе представлены основные элементы информационно-измерительной системы (ИИС) исследования электромагнитного излучения оптического диапазона, возбуждаемого электрическим взрывом металлических проводников. В качестве взрывающихся проводников использовались медные (Cu) и алюминиевые (Al) проволочки. В результате проведенных экспериментов получены в виде осциллограмм временные зависимости разрядного тока и интенсивности излучения при взрыве проводников при различных значениях энергии конденсаторного накопителя. Используя результаты экспериментов и расчетные соотношения, получены значения максимальной температуры металлической плазмы для медных (Cu)  $T_{Cu} \approx 56,31 \cdot 10^3 \text{ } ^\circ C$  и алюминиевых (Al) проводников.  $T_{Al} \approx 50,44 \cdot 10^3 \text{ } ^\circ C$ .

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chace W. G. and Moore H. K. [eds.], "Exploding Wires," Vol. I, Plenum Press, New York, 1959.
2. Иваненков, Г. В. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек. Часть I. Основные процессы электрического взрыва проводников в вакууме / Г. В. Иваненков, С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко и др. // Препринт ФИАН № 9. – М., 2004.
3. Christou, C. Temporally resolved visible and UV spectroscopy of exploding wires [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1):689–691.
4. Уруцкоев Л.И., Рухадзе А.А. и др. Исследование спектрального состава оптического излучения при электрическом взрыве вольфрамовой проволочки/ Краткие сообщения по физике ФИАН. № 7, 2012. С.15–22
5. Jin Yong, Li Bao-ming. Spectral analysis on electrical explosion of copper wire. Explosion and shock waves / Vol.34, No.2. Mart. 2014. PP. 252–256.
6. Орешкин, Е. В. Спектр излучения плазмы, формирующийся при взрыве микроострия / Е. В. Орешкин // Краткие сообщения по физике ФИАН. Физика плазмы и электрофизика. № 2, 2025. – С. 39–47
7. Yang Meng, Meng yuan Tang, Haruki Xue, Weidong Ding. The optical diagnosis of electrical wire explosion under a microsecond current pulse. Volume 93, Issue 9 September 2022. – DOI: 10.1063/5.0101713.
8. Суркаев, А. Л. Элементы физики высокоэнергетических импульсных процессов в конденсированных средах / А. Л. Суркаев // ВолгГТУ– Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – 156 с.
9. Суркаев, А. Л. Элементы физики электрического взрыва проводников в газообразных и конденсированных

средах / А. Л. Суркаев, М. М. Кумыш, В. И. Усачев, Д. А. Канцедалов, С. И. Благинин. – Волгоград: ВолгГТУ, 2021. – 204 с.

10. Кривицкий, Е. В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е. В. Кривицкий. – Киев: Наукова думка, 1986. – 205 с.

11. Суркаев, А. Л. К вопросу о согласованном режиме протекания электрического взрыва металлических проводников / Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. № 3(52). 2025. – С. 19–24. DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-19-24.

12. Котов Ю.А., Мельников М.А., Никитин В.В. К вопросу об электрическом взрыве проводников. / Известия ТПИ. Томск. Том № 180. 1971. С. 98–103.

13. Dang Juan Li, Yuyan Lu, Jia Wang, Rongli Guo, Kexuan Wang, Junhong Su, and Shen Jiang Wu / Measurement of plasma characteristic parameters of copper foil explosion using interferometry // Journal of the Optical Society of America A Vol. 41, Issue 12, (2024), pp. 2413–2420. – URL: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.539467>

14. Баранов, М. И. Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника / М. И. Баранов, В. О. Лысенко // Электричество № 4. 2013. – С. 24–30.

15. Баранов М.И., Рудаков С.В. Приближенный расчет основных характеристик плазмы при воздушном электрическом взрыве металлического проводника / Электротехника і Електромеханіка. – 2017. – № 6. С. 60–64. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.6.09.

16. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1987. – 592 с.

#### REFERENCES

1. Chace, W. G. and Moore H. K. [eds.], "Exploding Wires," Vol. I, Plenum Press, New York, 1959.
2. Ivanenkov, G. V., Pikuz S. A., Shelkovenko T. A., et al. Literature Review on Modeling of Electrical Explosion Processes of Thin Metal Wires. Part I. Main Processes of Electrical Explosion of Conductors in Vacuum. Preprint of the Lebedev Physical Institute (LPI) No. 9. Moscow, 2004.
3. Christou, C. Temporally Resolved Visible and UV Spectroscopy of Exploding Wires [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1):689–691.
4. Urutskoev, L. I., Rukhadze A. A., et al. Investigation of the Spectral Composition of Optical Radiation during Electrical Explosion of a Tungsten Wire/ Brief Communications on Physics of the Lebedev Physical Institute. № 7, 2012. Pp. 15–22.
5. Jin, Yong, Li Bao-ming. Spectral analysis on electrical explosion of copper wire. Explosion and shock waves / Vol. 34, No. 2. March. 2014. pp. 252–256.
6. Oreshkin, E. V. Plasma emission spectrum formed during microtip explosion / Brief communications on physics, Lebedev Physical Institute. Plasma Physics and Electro-physics. № 2, 2025. Pp. 39–47.
7. Yang, Meng, Meng Yuan Tang, Haruki Xue, Weidong Ding. The optical diagnosis of electrical wire explosion under a microsecond current pulse. Volume 93, Issue 9 September 2022. doi: 10.1063/5.0101713.
8. Surkaev, A. L. Elements of physics of high-energy pulse processes in condensed matter / VolGTU - Volgograd: IUNL VolGTU, 2015 - 156 p.
9. Surkaev, A. L. Elements of the physics of electrical explosion of conductors in gaseous and condensed media / Surkaev A.L., Kumysh M.M., Usachev V.I., Kantsedalov D.A., Blaginin S.I. // - Volgograd: Volgograd State Technical University Press, 2021. - 204 p.

10. *Krivitsky, E. V.* Dynamics of electrical explosion in liquid / Kyiv: Naukova Dumka, 1986.- 205 p.
11. *Surkaev, A. L.* On the issue of the coordinated mode of electrical explosion of metal conductors / Energy and resource saving: industry and transport. No. 3 (52). 2025. Pp. 19-24. DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-19-24.
12. *Kotov, Yu. A., Melnikov M.A., Nikitin V.V.* On the issue of electrical explosion of conductors. / Izvestia TPI. Tomsk. Vol. No. 180. 1971. Pp. 98-103.
13. *Dang, Juan Li, Yuyan Lu, Jia Wang, Rongli Guo, Kexuan Wang, Junhong Su, and Shen Jiang Wu* / Measurement of plasma characteristic parameters of copper foil explosion using interferometry // Journal of the Optical Society of America A Vol. 41, Issue 12, (2024), pp. 2413-2420. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.539467>.
14. *Baranov, M. I., Lysenko V.O.* Main characteristics of an electrical explosion of a metal conductor / Electricity, No. 4. 2013. pp. 24-30.
15. *Baranov, M. I., Rudakov S.V.* Approximate calculation of the main characteristics of plasma during an air electrical explosion of a metal conductor / Electrical Engineering and Electromechanics. 2017. No. 6. pp. 60-64 doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.09.
16. *Raizer, Yu. P.* Physics of gas discharge. – Moscow: Nauka, 1987. – 592 p.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026, доработана 09.02.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 02.02.2026, revised 09.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 66.045.122  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-30-37

Научная статья  
Original article

**Ю. В. Богданова<sup>1</sup>, А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>, А. Е. Новиков<sup>1</sup>, Д. П. Баев<sup>1,2</sup>, М. С. Кочетова<sup>1</sup>**

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СЕГМЕНТНЫХ ПЕРЕГОРОДОК  
В КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ  
НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ**

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>2</sup> ВФ ООО «Омсктехуглерод», Волгоград, Россия

✉ Юлия Валерьевна Богданова, [arisjulia@yandex.ru](mailto:arisjulia@yandex.ru)

**Аннотация.** Описан метод модернизации кожухотрубного подогревателя воздуха, подаваемого в реакторы на предприятии ООО «Омсктехуглерод», предотвращающий продольный переток воздуха в кольцевых зазорах между трубками и сегментными перегородками. Показана возможность увеличения коэффициента теплопередачи и снижения теплопередающей поверхности на 14 %, что, соответственно, приводит к уменьшению числа трубок и гидравлического сопротивления аппарата на 500 Па. Проведена оценка влияния способа установки трубок и их диаметра на коэффициент теплопередачи при их коридорном и шахматном расположении.

**Ключевые слова:** кожухотрубный теплообменник, коэффициент теплопередачи, рекуператор тепла, воздухоподогреватель, сегментные перегородки, гидравлическое сопротивление, диаметр трубок

**Для цитирования:** Богданова Ю. В., Голованчиков А. Б., Новиков А. Е., Баев Д. П., Кочетова М. С. Влияние конструкции сегментных перегородок в кожухотрубном теплообменнике на интенсивность процесса теплопередачи. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 30–37. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-30-37.

**Информация об авторах:**

**Юлия Валерьевна Богданова** – канд. техн. наук, доцент кафедры ПАХПП ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0006-0827-5238>

e-mail: [arisjulia@yandex.ru](mailto:arisjulia@yandex.ru)

**Александр Борисович Голованчиков** – д-р. техн. наук, профессор кафедры ПАХПП ВолгГТУ

Scopus ID: 6602843533

e-mail: [9275170082@mail.ru](mailto:9275170082@mail.ru)

**Андрей Евгеньевич Новиков** – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, заведующий кафедрой ПАХПП ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-8051-4786>

e-mail: [ae\\_novikov@mail.ru](mailto:ae_novikov@mail.ru)

**Денис Петрович Баев** – преподаватель кафедры ПАХПП ВолгГТУ

e-mail: [denispetrovichbaev@mail.ru](mailto:denispetrovichbaev@mail.ru)

**Марина Сергеевна Кочетова** – студент кафедры ПАХПП ВолгГТУ

e-mail: [marina19042003@gmail.com](mailto:marina19042003@gmail.com)

**Вклад авторов:**

**Ю. В. Богданова** – формулирование идеи, целей и задач исследования; создание/использование программного обеспечения, скриптов, алгоритмов; написание первоначального текста статьи.

**А. Б. Голованчиков** – анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**А. Е. Новиков** – редактирование текста.

**Д. П. Баев** – создание графиков, таблиц, схем, иллюстраций.

**М. С. Кочетова** – сбор данных, анализ литературы.

*Yu. V. Bogdanova<sup>1</sup>, A. B. Golovanchikov<sup>1</sup>, A. E. Novikov<sup>1</sup>, D. P. Baev<sup>1,2</sup>, M. S. Kochetova<sup>1</sup>*

**INFLUENCE OF THE DESIGN OF SEGMENTAL PARTITIONS  
IN SHELL AND TUBE APPARATUS ON THE INTENSITY  
OF THE HEAT TRANSFER PROCESS**

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

<sup>2</sup>VF LLC "Omsktekhuglerod", Volgograd, Russia

✉ Yulia V. Bogdanova, arisjulia@yandex.ru

**Abstract.** A method for upgrading a shell-and-tube air heater for reactor air at Omsktekhuglerod LLC is described. This method prevents longitudinal airflow in the annular gaps between the tubes and segmented baffles. The potential for increasing the heat transfer coefficient and reducing the heat-transfer surface area by 14 % is demonstrated, which, accordingly, leads to a reduction in the number of tubes and their hydraulic resistance by 500 Pa. The effect of tube installation and diameter on the heat transfer coefficient for in-line and staggered tube arrangements is assessed.

**Keywords:** shell-and-tube heat exchanger, heat transfer coefficient, heat recuperator, air heater, segmented baffles, hydraulic resistance, tube diameter

**For citation:** Bogdanova Yu. V., Golovanchikov A. B., Novikov A. E., Baev D. P., Kochetova M. S. Influence of the design of segmental partitions in shell and tube apparatus on the intensity of the heat transfer process. *Energio i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 1 (54): 30–37. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-30-37.

**Information about the authors:**

**Yulia V. Bogdanova** – PhD in Technical, Associate Professor of the PAHPP Department VSTU

e-mail: arisjulia@yandex.ru

**Alexander B. Golovanchikov** – Professor, Doctor of Technical Sciences of the PAHPP Department VSTU

e-mail: 9275170082@mail.ru

**Andrey E. Novikov** – Academician of the RAS, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of PAHPP VSTU

e-mail: ae\_novikov@mail.ru

**Denis P. Baev** – senior lecturer at the Department of PAHPP VSTU

e-mail: denispetrovichbaev@mail.ru

**Marina S. Kochetova** – postgraduate student of the PAHPP Department VSTU

e-mail: marina19042003@gmail.com

**Contribution of the authors:**

**Yulia V. Bogdanova** – formulation of the research idea, goals, and objectives; creation/use of software, scripts, and algorithms; writing the initial text of the article; creation of graphs, tables, diagrams, illustrations, and visualizations.

**Alexander B. Golovanchikov** – verification of results and experimental reproducibility; statistical, mathematical, and theoretical data analysis.

**Andrey E. Novikov** – editing, finalization, and review.

**Denis P. Baev** – organizational management (deadlines, coordination).

**Marina S. Kochetova** – data collection, literature analysis.

Нагрев воздуха, подаваемого в реакторы на предприятии ООО «Омсктехуглерод», осуществляется в рекуперативных воздухоподогревателях типа ПВЗ, в которых горячим теплоносителем служит высокотемпературная углеродогазовая смесь. Известно, что в трубчатых теплообменниках указанного типа для интенсификации теплопередачи в межтрубном пространстве устанавливают сегментные перегородки [1–3], обеспечивающие перекрестный ток теплоносителей и близкое к поперечному обтекание трубного пучка.

На рис. 1 представлена принципиальная схема движения теплоносителей в кожухотрубном теплообменнике-рекуператоре с сегментными перегородками на предприятии ООО «Омсктехуглерод».

Одной из проблем эксплуатации кожухотрубных теплообменников на предприятии в на-

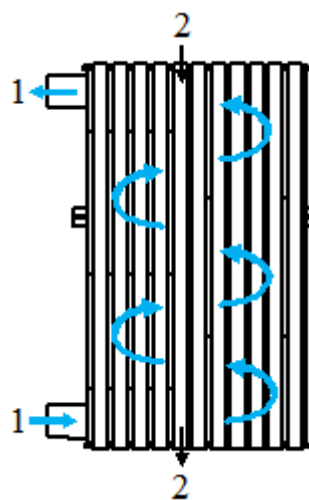


Рис. 1. Принципиальная схема движения теплоносителей в кожухотрубном теплообменнике-рекуператоре на предприятии ООО «Омсктехуглерод»: 1 – воздух среднего давления; 2 – аэрозоль технического углерода (углеродогазовая смесь)

стоящее время является снижение интенсивности теплообмена в аппаратах за счет утечек теплоносителя в зазорах между корпусом и перегородками.

Данная проблема решается рядом конструктивных предложений, описанных в литературных источниках, в частности, в работе [10] решение данной проблемы состоит в выполнении цилиндрического корпуса рекуператора возду-

хонагревателя сборным в виде отдельных выступающих за пределы корпуса секций с приваренными к ним разделительными перегородками, обеспечивающими перекрестное движение воздуха. Скрепление секций корпуса между собой осуществляется сваркой [13].

Конструкция такого кожухотрубного теплообменника для процесса нагрева воздуха, подаваемого в реактор синтеза технического углерода,

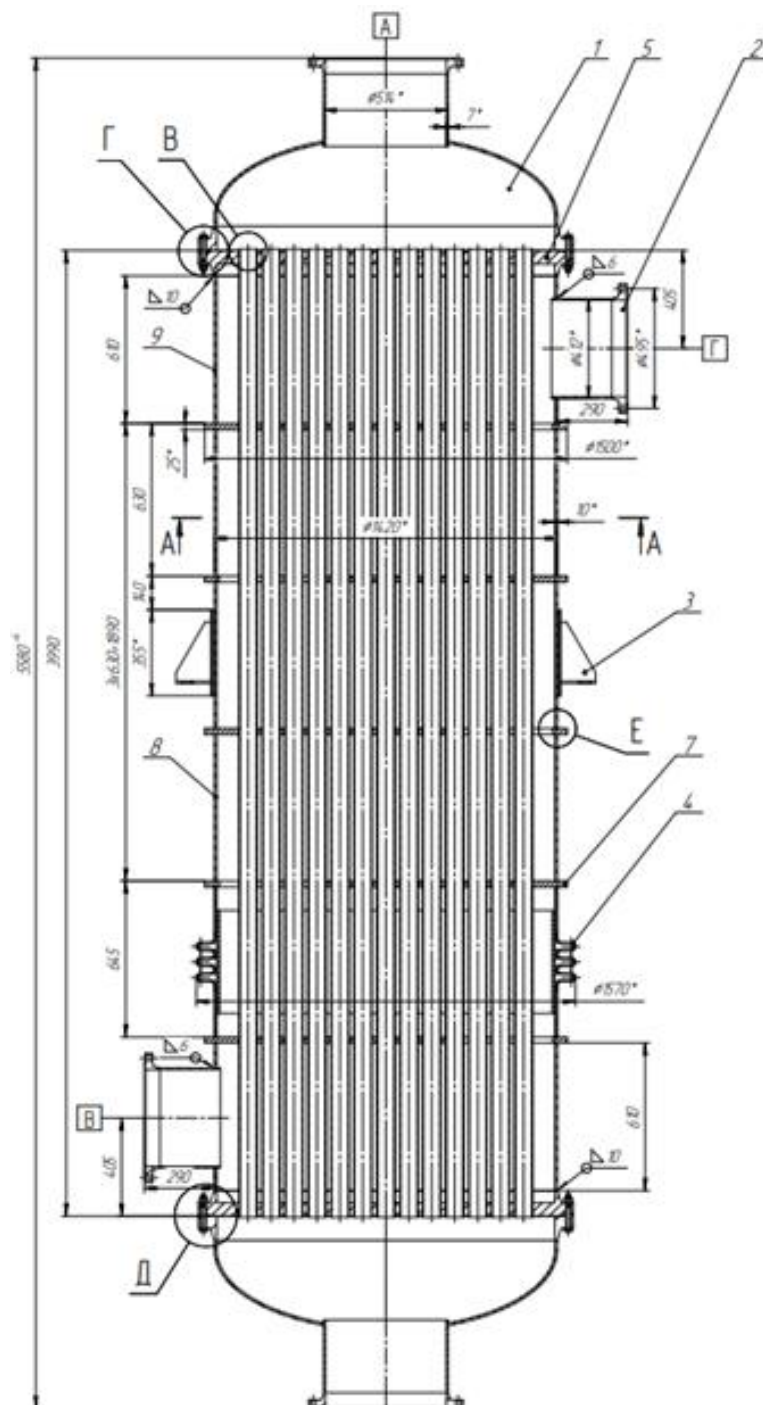


Рис. 2. Кожухотрубный теплообменник-рекуператор с учетом модернизации конструкции:

1 – крышка; 2 – штуцер; 3 – опора; 4 – линзовый компенсатор; 5 – трубная решетка; 6 – трубы; 7 – перегородка; 8, 9 – обечайки

представлена на рис. 2. Воздух среднего давления (ВСД) для сжигания природного газа давлением от 0,045 до 0,07 МПа подается в цех по трубопроводу из участка компрессорных установок, либо вырабатывается с помощью турбоустановки «Continental». К реактору ВСД подается через задвижку, диафрагму и регулируемую заслонку. Перед подачей в реактор ВСД поступает в нижнюю часть воздухоподогревателя для охлаждения нижней трубной решетки и затем на вход в воздухоподогреватель. Подогретый в воздухоподогревателе до температуры 500–700 °С воздух подается в реактор.

Поток воздуха, проходя полости подогревателя, ограниченные разделительными перегородками, наиболее полно контактирует со стенками труб, по которым течет высокотемпературный поток сажегазового аэрозоля. При этом обеспечивается наибольшая теплопередача между рабочими средами и наибольший теплосъем с нагретых труб, так как резко исклю-

чается количество застойных зон, которые до этого образовывались в большом количестве.

Воздухоподогреватель состоит из трубного пучка 6, трубы которого изготовлены из нержавеющей жаропрочной стали, и корпуса 8 с перегородками 7 для прохождения нагреваемого воздуха. Трубы жестко закреплены в трубных решетках 5. Температурная компенсация удлинения труб, по которым проходит высокотемпературный углеродогазовой смеси, осуществляется только за счет линзового компенсатора 4 корпуса 8 подогревателя. То есть при температурном удлинении трубного пучка трубы перемещаются вместе с трубной решеткой 5. Это перемещение передается на корпус 8 подогревателя, на котором имеется линзовый компенсатор 4, уравнивающий изменение длины трубного пучка [5–6].

Исходные и справочные данные для расчета и подбора конструкции воздухоподогревателя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные и справочные данные для расчета воздухоподогревателя

№ п/п	Параметр	Величина	Размерность
Исходные данные			
для холодного теплоносителя (воздуха)			
1.	Расход	17000	нм <sup>3</sup> /ч
2.	Температура на входе	90	°С
3.	Температура на выходе	600	°С
4.	Давление	0,07	МПа
5.	Динамическая вязкость	$52 \cdot 10^{-6}$	Па·с
6.	Плотность	0,73	кг/м <sup>3</sup>
7.	Теплопроводность	0,032	Вт/(м·К)
8.	Теплоемкость	1080	Дж/(кг·К)
для горячего теплоносителя (аэрозоля технического углерода)			
9.	Расход	40000	нм <sup>3</sup> /ч
10.	Температура на входе	950	°С
11.	Температура на выходе	640	°С
12.	Давление	0,045	МПа
13.	Динамическая вязкость	$43 \cdot 10^{-6}$	Па·с
14.	Плотность	0,79	кг/м <sup>3</sup>
15.	Теплопроводность	0,052	Вт/(м·К)
16.	Теплоемкость	1290	Дж/(кг·К)
Справочные данные			
17.	Термическое сопротивление загрязнений со стороны воздуха [7–12]	1/2800	м <sup>2</sup> ·К/Вт
18.	Термическое сопротивление загрязнений со стороны аэрозоля технического углерода	1/11600	м <sup>2</sup> ·К/Вт

Результаты расчета теплообменного аппарата представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета кожухотрубного теплообменника рекуператора

№ п/п	Параметр	Величина	Размерность
Технологический расчет			
1.	Тепловая нагрузка на аппарат	1024637	Вт
2.	Средняя температура воздуха	345	°С
3.	Средняя температура аэрозоля технического углерода	795	°С
ориентировочный расчет			
4.	Средняя движущая сила процесса теплопередачи	443	К
5.	Число труб, приходящееся на один ход теплообменника	163	-
6.	Ориентировочный коэффициент теплопередачи	20	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
7.	Ориентировочная поверхность теплопередачи	116	м <sup>2</sup>
уточняющий расчет			
8.	Поправочный коэффициент для средней движущей силы процесса теплопередачи при смешанном токе теплоносителей	0,60	-
9.	Коэффициент теплоотдачи от аэрозоля технического углерода к стенке труб трубного пучка	44	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
10.	Коэффициент теплоотдачи от стенки труб трубного пучка к воздуху	83	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
11.	Уточненный коэффициент теплопередачи	28	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
12.	Уточненная поверхность теплопередачи	83	м <sup>2</sup>
Гидравлический расчет			
13.	Скорость движения воздуха в штуцерах	9,4	м/с
14.	Скорость движения аэрозоля технического углерода в трубах	1,0	м/с
15.	Гидравлическое сопротивление аппарата	512	Па

Исходя из расчетов, был подобран воздухоподогреватель со следующими характеристиками (табл. 3):

1. Материал корпуса – сталь марки 12Х18Н10Т.

2. Трубные решетки в количестве 2 штук – сталь марки 12Х18Н10Т толщиной 40 мм.

3. Остальные детали (переходы, компенсатор, перегородки и т. д.) – сталь марки 12Х18Н10Т.

4. Внутренние перегородки в количестве 5 штук, равномерно расположенные по длине труб, перекрывают 70 % внутреннего сечения корпуса в межтрубном пространстве.

5. Диаметр подводящего и отводящего штуцеров для воздуха – 400 мм.

6. Диаметр подводящего и отводящего штуцеров для аэрозоля технического углерода – 500 мм.

Таблица 3

Параметры выбранного расчетом теплообменного аппарата

№ п/п	Параметр	Величина	Размерность
1.	Диаметр кожуха	1400	мм
2.	Диаметр труб	76×4	мм
3.	Число ходов	1	-
4.	Общее число труб	220	-
5.	Поверхность теплообмена	83	м <sup>2</sup>
6.	Длина труб	8	м
7.	Минимальное сечение потока в межтрубном пространстве	0,161	м <sup>2</sup>

Опираясь на результаты технологического и гидравлического расчетов воздухонагревателя, возможно подобрать оптимальный режим его эксплуатации.

Авторами проведен сравнительный анализ, подтвержденный расчетами на ЭВМ имеющегося в настоящее время на предприятии теплообменника-рекуператора, с описанной конструкцией в источнике [10].

Влияние повышения температуры воздуха на выходе из теплообменника за счет модернизации его конструкции на количество трубок

трубного пучка и поверхность теплообмена показано на рис. 3.

Из графиков рис. 3 видно, что увеличение температуры нагреваемого воздуха на  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  на выходе из рекуператора модернизированной конструкции позволяет сократить количество трубок трубного пучка с 220 до 163 штук за счет увеличения коэффициента теплопередачи с  $K = 28\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  до  $K = 32\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Влияние количества труб трубного пучка аппарата на гидравлическое сопротивление среды показано на рис. 4.

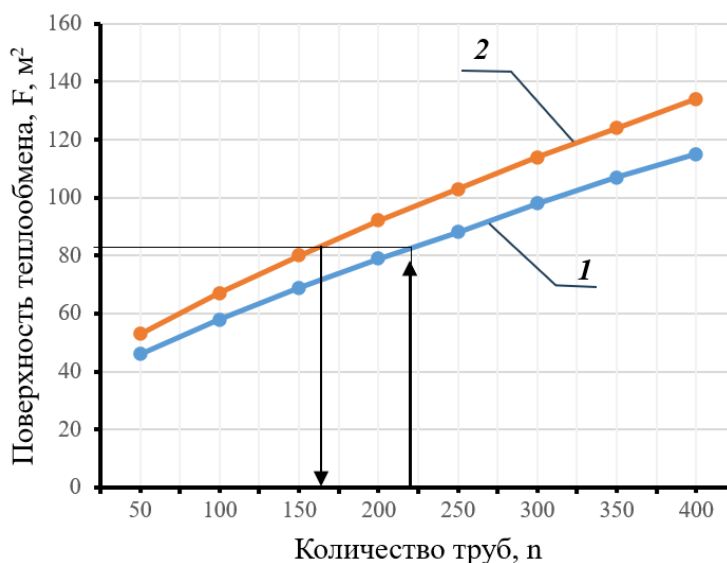


Рис. 3. Зависимость поверхности теплопередачи от количества труб трубного пучка в конструкции теплообменника при повышении температуры воздуха на  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
I – до модернизации; 2 – после модернизации

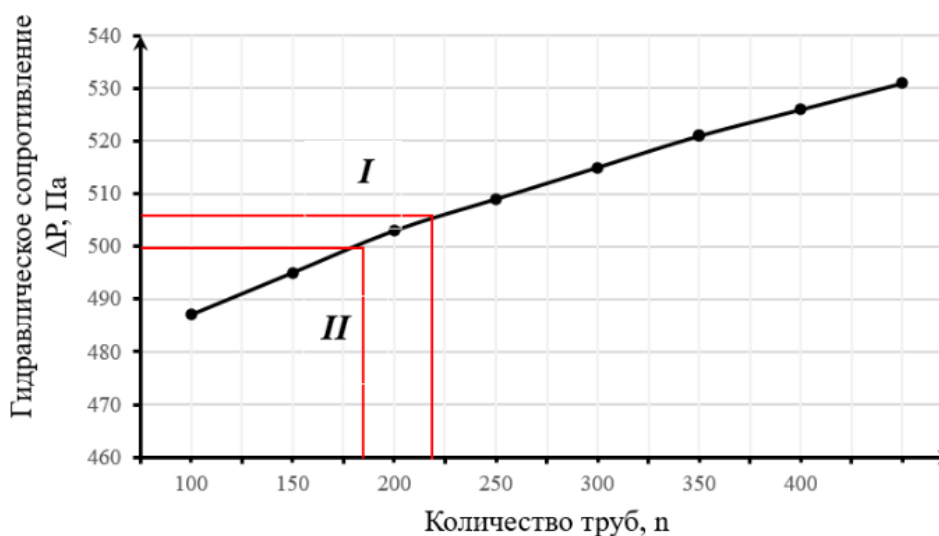


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления теплообменника от количества труб трубного пучка:  
I – до модернизации; II – после модернизации

Из графика рис. 4 видно, что снижение количества трубок в модернизированной кон-

струкции теплообменника до  $n = 163$  шт. позволяет уменьшить гидравлические сопротивления

аппарата вследствие изменения рабочего сечения труб до величины 504 Па.

Влияние расположения труб трубного пучка на коэффициент теплопередачи представлено в табл. 4.

Из табл. 3 видно, что максимальное значение коэффициента теплопередачи  $K = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при минимальной площади теплопередающей поверхности  $78 \text{ м}^2$  соответствует шахматному расположению трубных пучков.

Таблица 4

Расчет на ЭВМ основных параметров процесса теплопередачи в воздухонагревателе

№ п/п	Параметр и размерность	До модернизации	Модернизированная конструкция аппарата		
			С перегородками	Коридорное расположение пучков труб	Шахматное расположение пучков труб
1.	Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	28	32	33	35
2.	Поверхность теплопередачи, $\text{м}^2$	83	83	81	78
3.	Количество труб	220	163	163	163

Влияние изменения диаметра труб трубного пучка и коэффициента теплопередачи на гидравлическое сопротивление показано на рис. 5.

Высокие значения скорости движения теплоносителей, участвующих в теплообмене, позволяют достичь высокого значения коэффици-

ента теплопередачи и уменьшить требуемую поверхность теплообмена аппарата.

Однако увеличение скорости движения среды резко увеличивает и гидравлические сопротивления потоку, а значит и расход энергии [1–5].

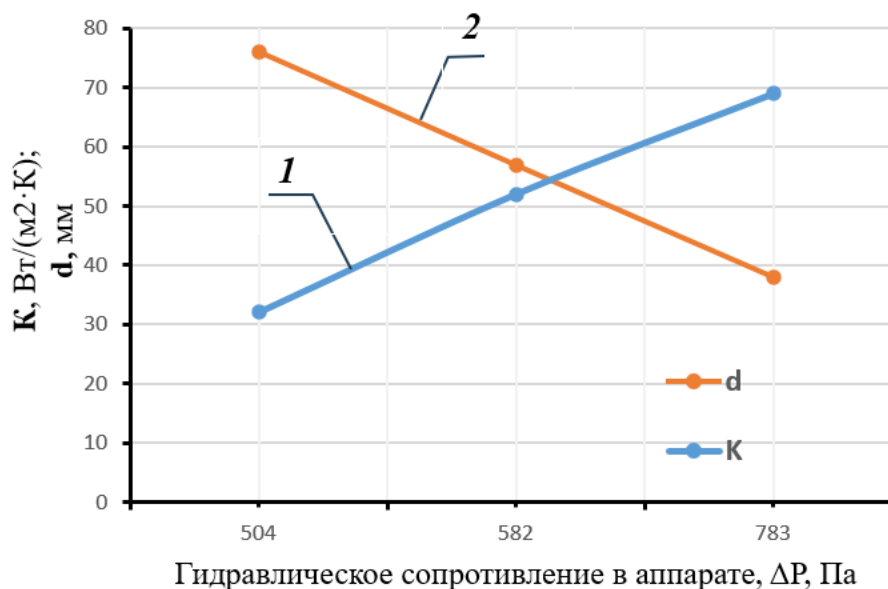


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи  $K$  (1) и диаметра труб трубного пучка  $d$  (2) от гидравлического сопротивления  $\Delta P$  в аппарате

Как показывают расчеты, снижение внутреннего диаметра труб ведет к большим отложениям сажи на стенках, что со временем увеличивает термическое сопротивление и снижает коэффициент теплопередачи, а также затрудняет очистку труб. Результаты расчетов на ЭВМ показали, что снижение диаметра труб вдвое увеличивает гидравлическое сопротивление на 50 %, которое составляет 783 Па, однако и ко-

эффициент теплопередачи увеличивается практически втрое и составляет  $K = 69 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

#### Выводы

Модернизация конструкции воздухоподогревателя технического углерода, заключающаяся в выполнении корпуса аппарата сборным в виде отдельных секций с приваренными к ним разделительными перегородками, кото-

рые выступают за пределы корпуса и обеспечивают перекрестное движение воздуха, позволяет снизить металлоемкость аппарата за счет снижения количества труб трубного пучка с 220 до 163 шт., а также интенсифицировать процесс нагрева технологического воздуха за счет увеличения коэффициента теплопередачи до  $K = 32 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Модернизация конструкции рекуператора тепла, заключающаяся в устранении кольцевых зазоров между разделительными перегородками и корпусом, через которые происходит продольный переток воздуха, позволяет обеспечить подогрев технологического воздуха до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , что приблизительно на  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  больше, чем в используемых теплообменниках в настоящее время на производстве ООО «Омсктехуглерод». Повышение температуры воздуха позволит снизить себестоимость получаемого продукта и улучшить экономические показатели процесса получения технического углерода [13].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Makeev, A. N.* Теплообменные аппараты с подвижной поверхностью теплообмена / А. Н. Макеев, М. С. Широков // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 1. – С. 93–97.
2. *Никulin, N. Yu.* Исследование теплообмена в интенсифицированном кожухотрубном аппарате / Н. Ю. Никulin // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2019. – № 4. – С. 77–82.
3. *Альперт, Л. З.* Основы проектирования химических установок / Л. З. Альперт. – М.: Высшая школа, 1989. – 303 с.
4. *Гельперин, Н. И.* Основные процессы и аппараты химической технологии в 2 т. / Н. И. Гельперин, Т. 1. – М.: Химия, 1981. – 406 с.
5. *Гельперин, Н. И.* Основные процессы и аппараты химической технологии в 2 т. / Н. И. Гельперин, Т. 2. – М.: Химия, 1981. – 409 с.
6. *Тимонин, А. С.* Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник / А. С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 1017 с.
7. *Дытнерский, Ю. И.* Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 1983.
8. *Дытнерский, Ю. И.* Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Ю. И. Дытнерский [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
9. *Касаткин, А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 7-е изд. – М.: Химиздат, 1961.
10. Пат. 2283988 Российская федерация, МПК F 23 L 15/04. Рекуперативный подогреватель технологического воздуха / Суровикин В. Ф., Спектор А. М., Царева Г. И.; заявитель и патентообладатель Институт проблем перера-

ботки углеводородов Сибирского отделения Российской академии наук. – 2005111678/06 ; заявл. 19.04.2005 ; опубл. 20.09.2006, бюл. № 26. – 3 с.

11. *Герасимчук, М. В.* Анализ методов интенсификации теплообменных процессов в теплообменниках химических производств / М. В. Герасимчук, А. В. Бальчугов // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2017. – № 11. – С. 74–75.

12. *Хикматова, Н. Г.* Способы повышения эффективности работы теплообменников / Н. Г. Хикматова // International Scientific and Practical Conference World science. – 2017. – Т. 1. – № 1 (17). – С. 12–14.

13. ГОСТ 31842-2012. Лист технических характеристик на кожухотрубчатый теплообменник. Технические требования. – Введ. 2012. – Москва: Изд-во стандартов, 2012. – 34 с.

#### REFERENCES

1. *Makeev, A. N.* Heat exchangers with a moving heat exchange surface / A. N. Makeev, M. S. Shirov // Modern trends in the development of science and technology. – 2017. – No. 1. – Pp. 93–97.
2. *Nikulin, N. Yu.* Study of heat transfer in an intensified shell-and-tube apparatus / N. Yu. Nikulin // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. – 2019. – No. 4. – Pp. 77–82.
3. *Alpert, L. Z.* Fundamentals of designing chemical plants / L. Z. Alpert – Moscow: Vysshaya shkola, 1989. – 303 p.
4. *Gelperin, N. I.* Basic processes and apparatuses of chemical technology in 2 volumes / N. I. Gelperin, T. 1. – Moscow: Chemistry, 1981. – 406 p.
5. *Gelperin, N. I.* Basic processes and apparatuses of chemical technology in 2 volumes / N. I. Gelperin, T. 2. – Moscow: Chemistry, 1981. – 409 p.
6. *Timonin, A. S.* Fundamentals of design and calculation of chemical-technological and environmental equipment. Directory / A. S. Timonin. – Kaluga: publishing house N. Bochkareva, 2002. – 1017 p.
7. *Dytnersky, Yu. I.* Basic processes and apparatus of chemical technology: textbook. allowance / Yu. I. Dytnersky. – Moscow: Chemistry, 1983.
8. *Dytnersky, Yu. I.* Basic processes and apparatuses of chemical engineering: Design manual / Yu. I. Dytnersky [et al.]. – 2nd ed., revised and supplemented. – Moscow: Chemistry, 1991. – 496 p.
9. *Kasatkin, A. G.* Basic processes and apparatuses of chemical engineering / A. G. Kasatkin. – 7th ed. – Moscow: Khimizdat, 1961.
10. Patent 2283988 Russian Federation, IPC F 23 L 15/04. Recuperative heater of process air / Surovikin V. F., Spektor A. M., Tsareva G. I.; applicant and patent holder Institute for Hydrocarbon Processing Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2005111678/06; declared 19.04.2005; published 20.09.2006, bulletin No. 26. – 3 p.
11. *Gerasimchuk, M. V.* Analysis of methods for intensifying heat exchange processes in heat exchangers of chemical plants / M. V. Gerasimchuk, A. V. Balchugov // Bulletin of Angarsk State Technical University. – 2017. – No. 11. – Pp. 74–75.
12. *Khikmatova, N. G.* Methods for improving the efficiency of heat exchangers / N. G. Khikmatova // International Scientific and Practical Conference World science. – 2017. – Vol. 1. – No. 1 (17). – Pp. 12–14.
13. GOST 31842-2012. Specifications for shell-and-tube heat exchangers. Technical requirements. – Introduced. 2012. – Moscow: Publishing House of Standards, 2012. – 34 p.

Статья поступила в редакцию 22.12.2025, доработана 29.01.2026, подписана в печать 13.02.2026

The article was submitted 22.12.2025, revised 29.01.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 669.213  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-38-43

Научная статья  
Original article

*А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>, А. А. Шурак<sup>1</sup>, Г. А. Наумова<sup>2</sup>*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ  
ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСПЛАВЕ СПЛАВА «ВУДА»**

<sup>1</sup> **Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

<sup>2</sup> **МГИМО МИД России, Москва, Россия**

✉ Антон Анатольевич Шурак, a-shurak2@mail.ru

**Аннотация.** Предложен способ осаждения частиц тяжелых металлов в расплавах легкоплавких сплавов, позволяющий частицам тяжелой дисперсной фазы осесть на дно отстойника, а частицам нерудного сырья оставаться на поверхности расплава.

Рассмотрены особенности физико-химических свойств легкоплавкого сплава «Вуда» в расплавленном состоянии. Описана экспериментальная установка и результаты экспериментальных исследований процесса осаждения свинцовой дроби и гетерогенной системы, состоящей из частиц вольфрама, моделирующих рудное сырье, и частицы песка, моделирующих нерудные отвалы, в расплаве легкоплавкого сплава «Вуда». Рассмотрен алгоритм расчета, позволяющий определять время осаждения частиц рудного сырья и всплывания частиц нерудных отвалов.

Предложена конструкция промышленного отстойника, позволяющая проводить одновременное разделение частиц тяжелых металлов и нерудных частиц в расплавах легкоплавких сплавов и удалять пустую породу с поверхности расплава, классифицировать уловленные частицы тяжелых металлов по фракциям, отделять их от расплава, который рециркулирует в системе, что позволяет проводить процесс в непрерывном режиме.

Показано преимущество разделения частиц металлов от частиц нерудного сырья в расплаве легкоплавкого сплава «Вуда», связанное с тем, что частицы тяжелых металлов имеют плотность в 2 и более раз выше плотности сплошной фазы легкоплавкого сплава «Вуда», а все частицы нерудного сырья имеют плотность в 2–3 раза меньше плотности расплава.

**Ключевые слова:** золотосодержащие руды и пески, отвалы, «хвосты», гравитационное мокрое обогащение, сплав Вуда, расплав, отстойник, осаждение

**Для цитирования:** Голованчиков А. Б., Шурак А. А., Наумова Г. А. Экспериментальное исследование осаждения частиц тяжелых металлов в расплаве сплава «Вуда». Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1 (54): 38–43. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-38-43.

**Информация об авторах:**

**Александр Борисович Голованчиков** – д-р техн. наук, профессор кафедры ПАХПП ВолгГТУ

Scopus id: 6602843533

e-mail: 9275170082@mail.ru

**Антон Анатольевич Шурак** – старший преподаватель кафедры ПАХПП ВолгГТУ

e-mail: a-shurak2@mail.ru

**Галина Алексеевна Наумова** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Международного ВТС и высоких технологий» МГИМО МИД России

e-mail: n-ga@bk.ru

**Вклад авторов:**

**А. Б. Голованчиков** – определение цели работы, анализ полученных данных.

**А. А. Шурак** – анализ полученных данных, проведение эксперимента, участие в обсуждении результатов.

**Г. А. Наумова** – написание текста статьи, разработка экспериментальной установки.

*A. B. Golovanchikov<sup>1</sup>, A. A. Shurak<sup>1</sup>, G. A. Naumova<sup>2</sup>*

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEPOSITION OF HEAVY  
METAL PARTICLES IN THE MELT OF THE WOOD ALLOY**

<sup>1</sup> **Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

<sup>2</sup> **Moscow State University of International Relation, Moscow, Russia**

✉ Anton A. Shurak, a-shurak2@mail.ru

**Abstract.** A method for settling heavy metal particles in low-melting alloy melts is proposed. This method allows particles of the heavy dispersed phase to settle to the bottom of the settling tank, while particles of non-metallic raw materials remain on the surface of the melt.

The physicochemical properties of the low-melting alloy "Wood's" in the molten state are examined. An experimental setup and the results of experimental studies of the sedimentation process of lead shot and a heterogeneous system consisting of tungsten particles simulating ore raw materials and sand particles simulating non-metallic waste in the low-melting alloy "Wood's" are described. A calculation algorithm for determining the sedimentation time of ore particles and the resurfacing time of non-metallic waste particles is discussed.

A proposed industrial settling tank design enables the simultaneous separation of heavy metal and non-metallic particles in low-melting alloy melts, removal of gangue from the melt surface, classification of captured heavy metal particles by fractions, and separation from the melt, which is recirculated within the system, enabling continuous operation.

The advantage of separating metal particles from non-metallic particles in the low-melting alloy "Wood" is demonstrated. This is due to the fact that heavy metal particles have a density two or more times higher than the density of the continuous phase of the low-melting alloy "Wood", while all non-metallic particles have a density two to three times lower than the melt density.

**Keywords:** gold-bearing ores and sands, dumps, "tailings", gravitational wet enrichment, Wood alloy, melt, settling tank, precipitation

**For citation:** Golovanchikov A. B., Shurak A. A., Naumova G. A. Experimental study of the deposition of heavy metal particles in the melt of the Wood alloy. *Energo- i resursosberezhnie: promyshlennost' i transport*. 2026; 1 (54): 38–43. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-38-43.

#### Information about the authors:

**Alexander B. Golovanchikov** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of PAHPP VSTU  
e-mail: 9275170082@mail.ru

**Anton A. Shurak** – Senior Lecturer in the Department of PAHPP VSTU  
e-mail: a-shurak2@mail.ru

**Galina A. Naumova** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of «International Military-Technical Cooperation and High Technologies» MGIMO  
e-mail: n-ga@bk.ru

#### Contribution of the authors:

**Alexander B. Golovanchikov** – determined the purpose of the work, data analysis.

**Anton A. Shurak** – data analysis, conducting an experiment, discussion of the results.

**Galina A. Naumova** – writing the original draft of the manuscript, development of an experimental setup.

В современных экономических условиях остро встает вопрос о повышении степени извлечения благородных металлов из руд. Это обуславливает необходимость совершенствования существующих и создания новых технологий извлечения, позволяющих не только повысить выход металлов из первичного рудного сырья, но и получить металл переработкой отходов, оставшихся от переработки руд по существующим технологиям. В частности, ввиду резкого роста цен на золото и снижения его добычи в России и в мире, крайне актуальной является проблема дополнительного извлечения из рудных отходов этого металла [1; 2].

Одним из способов повышения степени извлечения тяжелых металлов из «хвостов» является использование расплавов легкоплавких сплавов, что в отличие от традиционных методов обогащения и доизвлечения исключает образование токсичных переходных соединений [3; 4] и, тем самым, снижает экологический вред от процессов переработки руды.

Целью работы является экспериментальное исследование осаждения частиц тяжелых металлов при использовании в качестве сплошной фазы расплава сплава «Вуда», а также разработка способа обогащения золотосодержащих отвалов в этом расплаве.

Основной недостаток известных способов заключается в том, что вместе с целевым продуктом может оседать пустая порода, в связи с чем необходимо проводить дополнительные стадии обогащения и нести дополнительные затраты [3].

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Она состоит из цилиндрического металлического корпуса 1 диаметром 80 мм, внутри которого находится расплав сплава «Вуда» 2. Корпус 1 расположен на электронагревателе 3, а внутри него находятся уголки 4. Корпус аппарата 1 и уголки 4 выполнены из жаропрочной стали 12МХ.

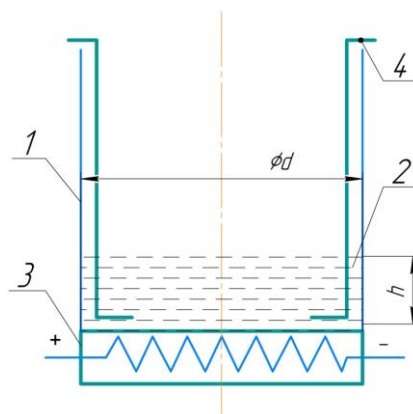


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса гравитационного осаждения частиц тяжелых металлов в расплаве сплава «Вуда»: 1 – цилиндрический корпус; 2 – расплав сплава «Вуда»; 3 – электронагреватель; 4 – уголки

Сплав «Вуда» имеет следующий состав: 25 масс. % Pb; 12,5 масс. % Sn; 12,5 масс. % Cd; 50 масс. % Bi. Его температура плавления равна  $T_{\text{п}} = 68 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , плотность  $\rho_{\text{с}} = 9500 \text{ кг/м}^3$ . Кинематическая вязкость расплава при  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $\nu = 3,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  [5].

В качестве модельных частиц тяжелого металла была взята свинцовая дробь и система вольфрам – песок.

Эксперимент проводился следующим образом. В цилиндрическую емкость  $l$  засыпался

$$m = h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho_c = 0,005 \cdot 0,785 \cdot (0,08)^2 \cdot 9500 = 0,238 \text{ кг.}$$

Ввиду того, что сплав «Вуда», как и чистый висмут, обладает температурной аномалией (при нагревании уменьшается в объеме), то с целью создания слоя расплава заданной высоты, исходный сплав берется с запасом в количестве 250 г.

Затем цилиндрический корпус  $l$  нагревают до температуры, на два градуса превышающей температуру плавления сплава «Вуда», и поддерживают ее в дальнейшем. При этом сплав «Вуда» переходит в расплавленное состояние и может выступать в качестве сплошной фазы в процессе гравитационного осаждения.

На поверхность расплава сплава «Вуда» равномерно распределяют частицы тяжелого металла, находящиеся в виде гомогенной (свинец) или гетерогенной (вольфрам – песок) системы.

После истечения времени осаждения электронагреватель  $3$  отключают, а цилиндрический корпус  $l$  снимают с его поверхности. Затем, после частичного застывания сплава «Вуда»  $2$ , он извлекается из цилиндрического кор-

пуса  $l$  с помощью уголков  $4$  для визуального анализа.

Изначально режим осаждения частиц неизвестен, поэтому первоначально необходимо рассчитать критерий Архимеда [6]:

Затем по формуле Тодеса определить критерий Рейнольдса [6]:

$$Ar = \frac{d_u^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot \left( \frac{\rho_u - \rho_c}{\rho_c} \right). \quad (1)$$

Тогда скорость осаждения будет равна:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar}}. \quad (2)$$

Тогда скорость осаждения будет равна:

$$w_{oc} = \frac{Re \cdot \nu}{d}, \quad (3)$$

а время осаждения может быть рассчитано по формуле:

$$\tau = \frac{h}{w_{oc}}. \quad (5)$$

Результаты расчетов по формулам (1) – (5) приведены в таблице.

Сводный расчет определения времени осаждения

Параметр	Размерность	Свинец	Вольфрам – песок
Диаметр частиц	мм	1,25	1,00
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	11350	19250 / 1500
Критерий Архимеда	-	0,036	0,097
Критерий Рейнольдса	-	0,0020	0,0053
Скорость осаждения	м/с	0,000512	0,001720
Время осаждения	с	9,760	2,907

Исходя из теоретически полученных данных, после выгрузки частиц, находящихся на поверхности расплава сплава «Вуда», нагрев отключался, и выдерживалось время частичного застывания расплава.

В результате эксперимента, после изъятия сплава «Вуда», на дне наблюдались частицы свинца и вольфрама, что подтверждает гипотезу о том, что процесс осаждения тяжелых ме-

таллов можно проводить в расплавах легкоплавких сплавов [3; 4].

На рис. 2 представлены фрагменты свинцовых частиц в расплаве сплава после выгрузки.

По результатам экспериментальных исследований авторами предложена конструкция аппарата (рис. 3) для реализации способа обогащения отвального продукта в расплаве сплава «Вуда» [7].



Рис. 2. Частицы свинца в расплаве сплава «Вуда»

Отвальный продукт подают в корпус 1 вертикального отстойного аппарата через распределители 2, которые обеспечивают равномерное распределение отвального продукта по поверхности расплава сплава «Вуда». На внешней части корпуса 1 расположен нагревательный элемент 3, выполненный в виде электронагре-

вателя или рубашки, в которую подается пар, а сам корпус 1 сделан из жаропрочной стали (например 12МХ, 15ХМ, 12Х18Н10Т). Внутри корпуса 1 размещен (залит) расплав сплава «Вуда» 4, при постоянной температуре 71–81 °С, поддерживаемой за счет нагревательного элемента 2.

Нижняя часть корпуса 1 отстойного аппарата представляет собой коническое днище, снабженное верхней 5 и нижней 6 задвижками. В начале работы, когда подают отвальный продукт, верхняя задвижка 5 открыта, а нижняя задвижка 6 – закрыта.

Отвальный продукт оставляют в корпусе 1 отстойного аппарата для осаждения. В процессе осаждения под воздействием сил тяжести частицы золота осаждаются в расплаве сплава «Вуда» вследствие того, что плотность данных частиц в 2 раза больше плотности расплава сплава. Частицы пустой породы, представленные в таблице, имеют плотность в 3–8 раз меньше, чем у расплава, что препятствует их оседанию.

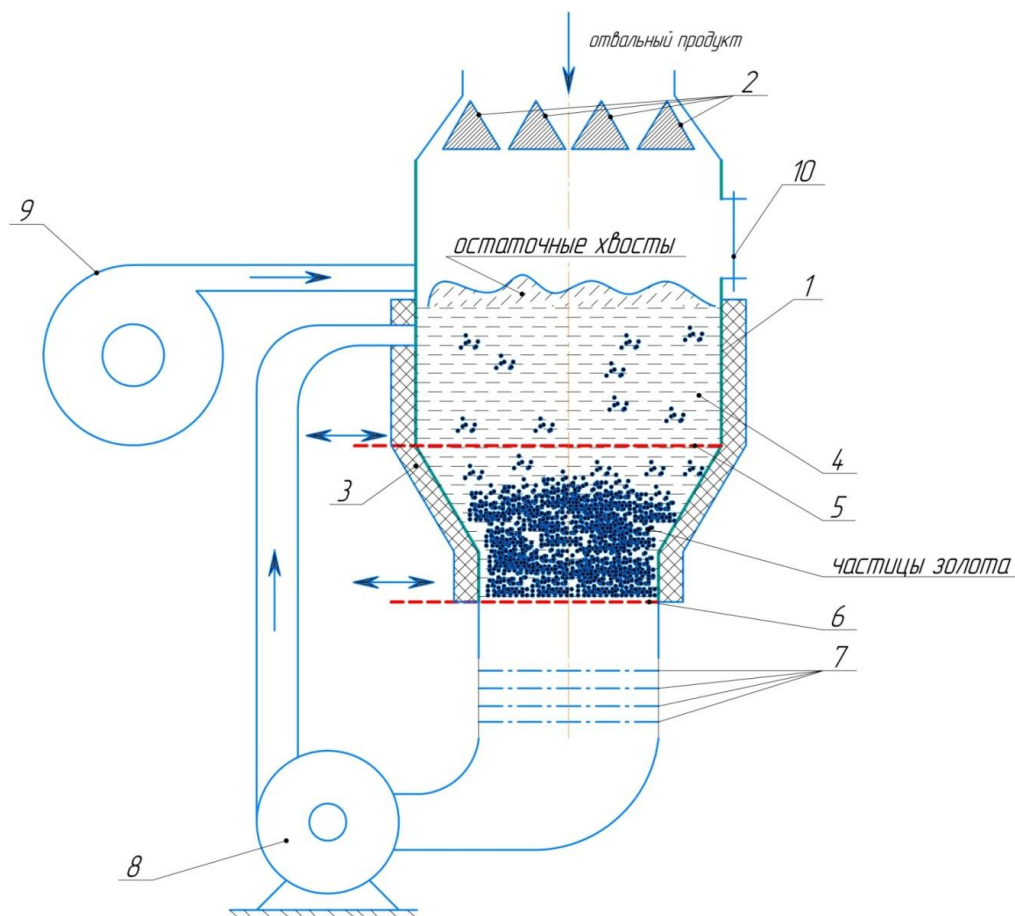


Рис. 3. Схема установки для обогащения золотосодержащих отвалов в расплаве сплава «Вуда»: 1 – корпус; 2 – распределители; 3 – нагревательный элемент; 4 – расплав сплава «Вуда»; 5, 6 – задвижки; 7 – сита; 8 – МГД-насос; 9 – газодувка; 10 – технологическое отверстие

Время цикла отстаивания в отстойнике принимается как время осаждения частиц средневзвешенного размера.

По истечении времени осаждения частиц золота на дне отстойного аппарата, верхнюю задвижку 5 закрывают, а после нижнюю задвижку 6 открывают, осуществляя выгрузку (сброс) осадка в цилиндрическую сепарационную зону, внутри которой последовательно друг за другом размещены сита 7, калибр которых уменьшается от верхнего сита 7 к нижнему. Наименьший диаметр калибра сит 7 не превышает минимального диаметра частиц золота в отвальном продукте, сита 7 выполнены, например, из полиамидной ткани. В сепарационной зоне происходит улавливание частиц золота на поверхности сит 7, а расплав сплава «Вуда» 4 походит через них и магнитогидродинамическим насосом (МГД-насосом) 8 подается обратно в корпус 1 отстойника.

Одновременно в процессе выгрузки осадка из корпуса 1 отстойника, осуществляют удаление остаточных «хвостов», например, продувку поверхности расплава «Вуда» 4 газодувкой 9 и выводят «хвосты» из корпуса 1 через технологическое отверстие 10, освобождая поверхность сплава «Вуда» 4 для последующего цикла отстаивания.

После завершения разделения в сепарационной зоне нижнюю задвижку 6 закрывают, а верхнюю задвижку 5 открывают и начинают новый цикл отстаивания, снова загружая в корпус 1 отвальный продукт на обогащение.

После завершения разделения в сепарационной зоне, при закрытой нижней задвижке 6, сита 7 извлекают из сепарационной зоны и очищают от частиц золота, которые направляются на дальнейшую переработку, а сами сита 7 направляют обратно в сепарационную зону.

#### Выводы

1. Предложен метод обогащения тяжелых металлов из отвалов и «хвостов» горнообогатительных предприятий, основанный на гравитационном разделении металла от нерудного сырья в расплаве сплава Вуда, что позволяет увеличить степень извлечения и повысить чистоту получаемых частиц золота при меньших затратах, а также извлекать частицы тонкого золота.

2. Разработана экспериментальная установка и проведено исследование процесса осаждения частиц тяжелых металлов в расплаве сплава «Вуда». Теоретически получено уравнение для определения времени осаждения.

3. Предложена конструкция для реализации указанного лабораторного способа в промышленности с возможностью его осуществления с другими легкоплавкими сплавами [8–9].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дроздова, И. В. Современное состояние золотодобычи в России и Узбекистане / И. В. Дроздова, А. А. Бобоев, С. С. Тимофеева // Техносферная безопасность в XXI веке : сборник научных трудов магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Иркутск, 26–27 ноября 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 31–36.

2. Боженов, И. А. Обзор мирового рынка золотодобычи / И. А. Боженов // Валютное регулирование. Валютный контроль. – 2024. – № 8. – С. 37–45.

3. К вопросу о гравитационном мокром разделении бедных золотосодержащих руд, песков и отвалов обогатительных предприятий / А. Б. Голованчиков, А. А. Шурак, А. Б. Дулькин, Б. А. Дулькин // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2024. – № 3 (48). – С. 14–19. – URL: <https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2024-3-48-14-19>.

4. Гравитационное обогащение в тяжелой жидкости бедных руд, содержащихся в отвалах и шламах / А. Б. Голованчиков, А. Б. Дулькин, Б. А. Дулькин [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2025. – № 3. – С. 49–56. – URL: <https://www.doi.org/10.25791/esip.3.2025.1511>.

5. Казанджан, Б. И. Экспериментальное исследование электропроводности, плотности и вязкости сплава Вуда / Б. И. Казанджан, В. М. Матвеев, Т. Б. Савич, А. М. Умаров // Теплофизика высоких температур. – 1989. – Т. 27, № 2. – С. 269–273.

6. Малиновская, Т. А. Разделение суспензий в химической промышленности / Т. А. Малиновская. – М.: Химия, 1983. – 264 с.

7. Патент № 2814049 С1 Российская Федерация, МПК С22В 11/00, В03В 7/00. Способ гравитационного извлечения золота при обогащении россыпей: заявл. 24.11.2023 : опубл. 21.02.2024 / А. Б. Голованчиков, А. А. Шурак, В. Т. Фомичев, Г. А. Наумова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

8. Патент № 2814039 С1 Российская Федерация, МПК В03В 7/00, С22В 11/00. Способ гравитационного извлечения золота при обогащении россыпей : заявл. 24.11.2023 : опубл. 21.02.2024 / А. Б. Голованчиков, А. А. Шурак, В. Т. Фомичев, Г. А. Наумова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

9. Патент № 2814050 С1 Российская Федерация, МПК С22В 11/00, В03В 7/00. Способ гравитационного извлечения золота при обогащении россыпей : заявл. 13.12.2023 : опубл. 21.02.2024 / А. Б. Голованчиков, А. А. Шурак, В. Т. Фомичев, Г. А. Наумова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

#### REFERENCES

1. Drozdova, I. V. The Current State of Gold Mining in Russia and Uzbekistan / I. V. Drozdova, A. A. Boboev, S. S. Timofeeva // Technosphere Safety in the 21st Century: Collec-

tion of Scientific Papers by Master's and Postgraduate Students and Young Scientists, Irkutsk, November 26-27, 2019. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2019. – P. 31-36.

2. *Bozhenkov, I. A.* Overview of the Global Gold Mining Market // Currency Regulation. Currency Control. – 2024. – № 8. – P. 37-45.

3. On the issue of gravity wet separation of poor gold-bearing ores, sands, and tailings of processing plants / A. B. Golovanchikov, A. A. Shurak, A. B. Dulkan, B. A. Dulkan // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2024. – № 3(48). – P. 14-19. <https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2024-3-48-14-19>.

4. Gravitational enrichment of poor ores contained in dumps and slurries in a heavy liquid / A. B. Golovanchikov, A. B. Dulkan, B. A. Dulkan, A.A. Shurak, N.A. Prokhorenko // Ecological Systems and Devices. – 2025. – № 3. – P. 49-56. <https://www.doi.org/10.25791/esip.3.2025.1511>.

5. *Kazandzhan, B. I., Matveyev V.M., Savich T.B., Umarov A.M.* Experimental study of the electrical conductivi-

ty, density, and viscosity of the Wood alloy // High Temperature Thermal Physics – 1989. – Vol. 27. – № 2. – P. 269-273.

6. *Malinovskaya, T. A.* Separation of Suspensions in the Chemical Industry / T. A. Malinovskaya. – Moscow: Khimiya, 1983. – 264 p.

7. Patent 2814049 Russian Federation, IPC C22B 11/00, B03B 7/00. Method for Gravitational Extraction of Gold During Placer Concentration / A. B. Golovanchikov, A. A. Shurak, V. T. Fomichev, G. A. Naumova; Volgograd State Technical University. – 2024.

8. Patent 2814039 Russian Federation, IPC C22B 11/00, B03B 7/00. Method for Gravitational Extraction of Gold During Placer Concentration / A. B. Golovanchikov, A. A. Shurak, V. T. Fomichev, G. A. Naumova; Volgograd State Technical University. – 2024.

9. Patent 2814050 Russian Federation, IPC C22B 11/00, B03B 7/00. Method for Gravitational Extraction of Gold During Placer Concentration / A. B. Golovanchikov, A. A. Shurak, V. T. Fomichev, G. A. Naumova; Volgograd State Technical University. – 2024.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025, доработана 20.01.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 01.12.2025, revised 20.01.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 612.172.4:004

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-43-52

Научная статья

Original article

*В. И. Конченков, А. В. Сомов, П. С. Тарасов, Г. А. Шишкин*

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ И ТИПА ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Александр Викторович Сомов, [direktor7033@mail.ru](mailto:direktor7033@mail.ru)

**Аннотация.** В результате выполненного исследования была разработана и экспериментально проверена система для регистрации электрокардиограммы человека и одновременной регистрации типа физической активности. Проведенные исследования подтвердили возможность идентификации различных типов физических активностей человека, а именно покой в положении сидя, ходьба, занятия на велотренажере и приседания.

**Ключевые слова:** МЭМС-акселерометр, электрокардиограф, определение типа физической активности, алгоритм, мониторинг, система

**Для цитирования:** Конченков В. И., Сомов А. В., Тарасов П. С., Шишкин Г. А. Разработка цифровой системы для регистрации электрокардиограммы и типа физической активности человека. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 43–52. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-43-52.

### Информация об авторах

**Владимир Игорьевич Конченков** – канд. физ.- мат. наук, доцент кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы» ВолгГТУ

Scopus: 35105284600

e-mail: [kontchenkov@yandex.ru](mailto:kontchenkov@yandex.ru)

**Александр Викторович Сомов** – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электротехника» ВолгГТУ

e-mail: [direktor7033@mail.ru](mailto:direktor7033@mail.ru)

**Павел Сергеевич Тарасов** – старший преподаватель кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы» ВолгГТУ

Scopus: 57195641522

e-mail: [tarasradio@mail.ru](mailto:tarasradio@mail.ru)

**Глеб Андреевич Шишкин** – магистрант ВолгГТУ

e-mail: [stopstep34@yandex.ru](mailto:stopstep34@yandex.ru)

### Вклад авторов

**В. И. Конченков** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

**А. В. Сомов** – определение цели работы, участие в обсуждении результатов.

**П. С. Тарасов** – проведение расчетов, написание текста статьи.

**Г. А. Шишкин** – проведение расчетов, написание текста статьи.

*V. I. Konchenkov, A. V. Somov, P. S. Tarasov, G. A. Shishkin*

**DEVELOPMENT OF A DIGITAL SYSTEM FOR RECORDING  
ELECTROCARDIOGRAMS AND PHYSICAL ACTIVITY TYPES**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Alexander V. Somov, direktor7033@mail.ru

**Abstract.** As a result of the study, a system for recording a person's electrocardiogram and simultaneously recording the type of physical activity was developed and experimentally tested. The conducted studies confirmed the possibility of identifying various types of human physical activities, namely sitting rest, walking, cycling, and squats.

**Keywords:** MEMS-accelerometer, electrocardiograph, determination of the type of physical activity, algorithm, monitoring, system

**For citation:** Konchenkov V. I., Somov A. V., Tarasov P. S., Shishkin G. A. Development of a digital system for recording electrocardiograms and physical activity types. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 1(54): 43–52. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-43-52.

**Information about the authors:**

**Vladimir I. Konchenkov** – Ph.D., Associate Professor of "Electronic Computers and Systems" VSTU

e-mail: kontchenkov@yandex.ru

**Alexander V. Somov** – Ph.D in Pedagogic Sciences, Associate Professor of "Electronic Computers and Systems" VSTU.

e-mail: direktor7033@mail.ru

**Pavel S. Tarasov** – Senior Lecturer of the Department of Electronic Computers and Systems, Associate Professor of "Electronic Computers and Systems" VSTU.

e-mail: tarasradio@mail.ru

**Gleb A. Shishkin** – Master's student, Associate Professor of "Electronic Computers and Systems" VSTU.

e-mail: stopstep34@yandex.ru

**Contribution of the authors**

**Vladimir I. Konchenkov** – definition of the work goal, participation in the results discussion.

**Alexander V. Somov** – definition of the work goal, participation in the results discussion.

**Pavel S. Tarasov** – calculations, writing the article text.

**Gleb A. Shishkin** – calculations, writing the article text.

**Введение**

В процессе реабилитации пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями при холтеровском мониторинговании сердечной деятельности (см., например, [1]) возникает необходимость в объективном контроле типа и интенсивности физической активности, выполняемой пациентом в момент регистрации кардиограммы. Отсутствие такой информации не позволяет в полной мере оценить адекватность реакции сердечно-сосудистой системы на нагрузку. В связи с этим в работе решается задача разработки микропроцессорного устройства, обеспечивающего синхронизированную регистрацию электрокардиограммы и данных МЭМС-акселерометра с целью последующей классификации типов движений. Предлагаемая система также может рассматриваться как прототип измерительного модуля для тренажерного оборудования с функцией адаптивного изменения нагрузки.

В научной литературе в настоящее время проводится множество исследований, связанных с мониторингом физической активности и состоянием сердечно-сосудистой системы человека [2–7]. В работе [2] представлена беспроводная сенсорная система, предназначенная для оценки физических характеристик спортсменов во время тренировок. Система с помощью со-

четания данных о движении и сердечном ритме позволяет не только измерять частоту сердечных сокращений, но и рассчитывать метрики двигательной активности, что делает подход актуальным для мониторинга интенсивных физических нагрузок. В работе [3] анализируют современные методы использования акселерометрии для изучения двигательной активности у детей и подростков с нарушениями нервно-мышечной системы. Авторы подчеркивают, что акселерометрические датчики позволяют получить подробную характеристику движений в естественных условиях и являются одним из наиболее объективных инструментов для оценки уровня активности. Также в статье отмечается, что существует острая необходимость в дальнейшей разработке классификаторов для детей с серьезными двигательными нарушениями, детей дошкольного возраста и детей, находящихся в больничных условиях.

В работе [4] рассматриваются конструктивные и технологические особенности низкочастотных МЭМС-акселерометров, применяемых в медицинском мониторинге. Авторы подчеркивают, что современные акселерометры обладают высокой точностью, малым энергопотреблением и стабильностью сигнала, что делает их оптимальными для создания носимых

систем наблюдения за человеком и анализа малых амплитуд движений, характерных для медицинских задач.

Среди отечественных научных работ можно выделить работу [5], в которой рассматриваются механические особенности прототипа реабилитационного экзоскелета нижних конечностей, включая анализ распределения нагрузок и кинематических характеристик движения. Автор подчеркивает важность точных сенсорных данных для корректной работы реабилитационных систем, что подтверждает необходимость развития методов объективного мониторинга двигательной активности. В работе [6] при помощи акселерометра, смонтированного на гантели, определяется характер движения руки человека.

Практика реабилитации пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями требует определения научно обоснованной дозировки физической нагрузки, для чего разрабатываются цифровые системы мониторинга физических нагрузок (см., например, [8]). Кроме знания интенсивности физической нагрузки при заданном типе движений (например, занятия на ве-

лотренажере) полезно знать тип движений человека для расширения возможностей системы мониторинга на тренировки в естественных условиях (ходьба, отдых, бег, приседания). Таким образом, актуальной является разработка методики совместного автоматического определения типа физической активности человека и регистрации параметров сердечной деятельности.

Целью работы является разработка микропроцессорной системы, реализующей определение типа физической активности на основе данных МЭМС-акселерометра и определение пульса с возможностью сохранения этих сведений для последующего анализа для определения стратегии дальнейшей реабилитации пациентов.

#### Методика определения активности человека по данным акселерометра

В настоящее время с появлением недорогих и достаточно точных МЭМС-акселерометров есть возможность определять характер движений человека по данным таких приборов. Наиболее просто исследовать периодические (или почти периодические) процессы – ходьба, бег, езда на велосипеде или занятия на велотренажере.

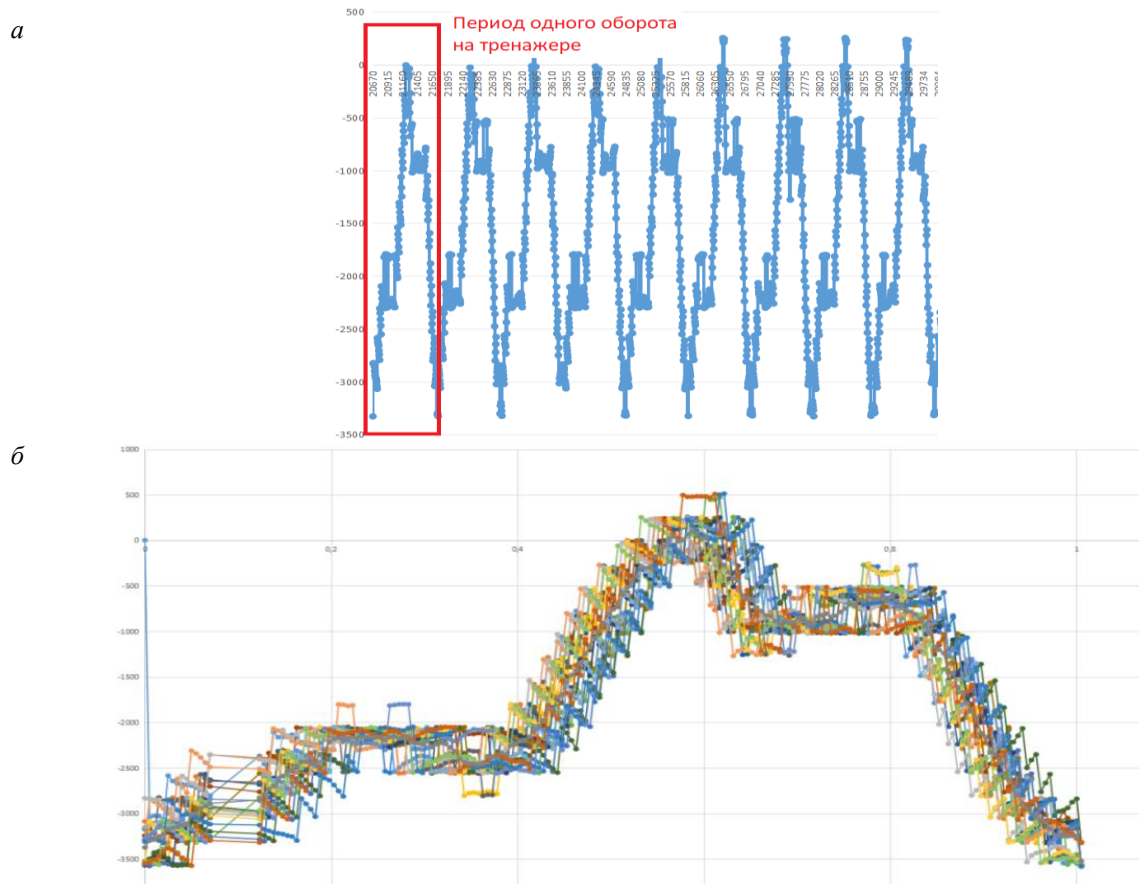


Рис. 1. Значения проекции ускорения, регистрируемого акселерометре при занятиях на велотренажере: *a* – исходные данные; *б* – значения ускорения за один период оборота педалей в разные периоды

Таблица 1

## Реализации стационарного случайного процесса

№ реализации	t						
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	...	t <sub>N</sub>
1	0,64	0,74	0,62	0,59	0,35	...	-0,39
2	0,54	0,37	0,06	-0,32	-0,60	...	-0,67
3	0,34	0,50	0,37	0,26	-0,52	...	0,42
4	0,23	0,26	0,35	0,55	0,69	...	0,80
...	...	...	...	...	...	...	...
n	-0,16	-0,12	-0,15	0,05	0,29	...	0,63

Авторами была разработана и изготовлена микропроцессорная система (описана ниже), содержащая МЭМС-модуль MPU9250, имеющий в своем составе акселерометр, выполняющий измерение ускорения. На рис. 1, а представлен график зависимости проекции ускорения от времени. Хорошо видна периодичность получаемых значений. На рис. 1, б значения проекции ускорения в течение разных периодов построены на одном графике. Из рис. 1, б видно, что данные о физической активности человека в течение одного периода движения (шаг, оборот педалей велотренажера), полученные с акселерометра, имеют вид непрерывных случайных колебаний вокруг некоторого среднего

значения, и можно рассматривать эти графики как реализации стационарного случайного процесса [9]. Для описания стационарного случайного процесса используется корреляционная функция [9–10], которая в нашем случае может служить маркером типа движения.

Для расчета данной функции первоначально строим матрицу (табл. 1) с номером реализаций по строкам и временной шкалой по столбцам (значения проекции ускорения в строках взяты условные). Зависимость математического ожидания  $M(t)$  от времени получаем, усредняя данные по столбцам.

Дальше строим корреляционную матрицу (табл. 2):

$$\text{Corr}(t_k, t_l) = \left( \frac{\sum_{i=0}^n X(t_k)X(t_l)}{n} - M(t_k)M(t_l) \right) \sqrt{\frac{n}{n-1}}. \quad (1)$$

Здесь  $X(t_k)$  – столбец значений из табл. 1, соответствующий моменту времени  $t_k$ . В первом слагаемом в скобках осуществляем суммирование по всем строкам.

В главной диагонали табл. 2 стоят значения дисперсии случайной величины в момент времени  $t_k$ . Нормируем корреляционную матрицу

на значения дисперсии. Для получения корреляционной функции усредняем значения в корреляционной матрице вдоль параллелей главной диагонали и приписываем соответствующим значениям  $t_k$ .

Пример значений корреляционной функции приведен в табл. 3.

Таблица 2

## Корреляционная матрица

t'	t						
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	...	t <sub>N</sub>
t <sub>1</sub>	0,1632	0,1379	0,0795	0,0457	-0,0106	...	-0,0648
t <sub>2</sub>		0,2385	0,2029	0,1621	0,0827	...	0,0251
t <sub>3</sub>			0,2356	0,2152	0,1527	...	0,0896
t <sub>4</sub>				0,2207	0,1910	...	0,1322
t <sub>5</sub>					0,2407	...	0,1711
...	...	...	...	...	...	...	...
t <sub>N</sub>						...	0,2878

Таблица 3

Значения корреляционной функции

t	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	...	t <sub>N</sub>
$\tilde{\rho}_x(\tau)$	1,00	0,84	0,60	0,38	0,13	...	-0,30

Как показывает опыт, значения корреляционной функции  $\tilde{\rho}_x(\tau)$  различны для различных типов физической активности, поэтому можно считать корреляционную функцию признаком типа физической активности. Для сравнения признаков вычисляем линейный коэффициент корреляции между ними по формуле:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sigma_x\sigma_y}, \quad (2)$$

где  $\overline{xy}$  – среднее значение произведения признаков,  $\bar{x}, \bar{y}$  – средние значения признаков,  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – стандартные отклонения признаков.

Для оценки коэффициента корреляции используем шкалу Чеддока: если значение коэффициента корреляции больше либо равно 0,7, считаем что типы физической активности совпадают.

На рис. 2 приведены графики с исследуемыми и эталонными данными предполагаемых физических активностей. Видно, что график корреляционной функции исследуемой активности больше всего схож с графиком эталонной корреляционной функции, соответствующей занятиям на велотренажере. По графикам можно визуально определить, к какому типу физической активности относятся текущие движения.

В результате работы программы получаем значения коэффициентов корреляции для разных активностей 0,92 – для занятия на велотренажере, 0,63 – для бега и 0,22 – для ходьбы. Следовательно, текущей физической активностью является активность на велотренажере. Полученный результат соответствует действительности.

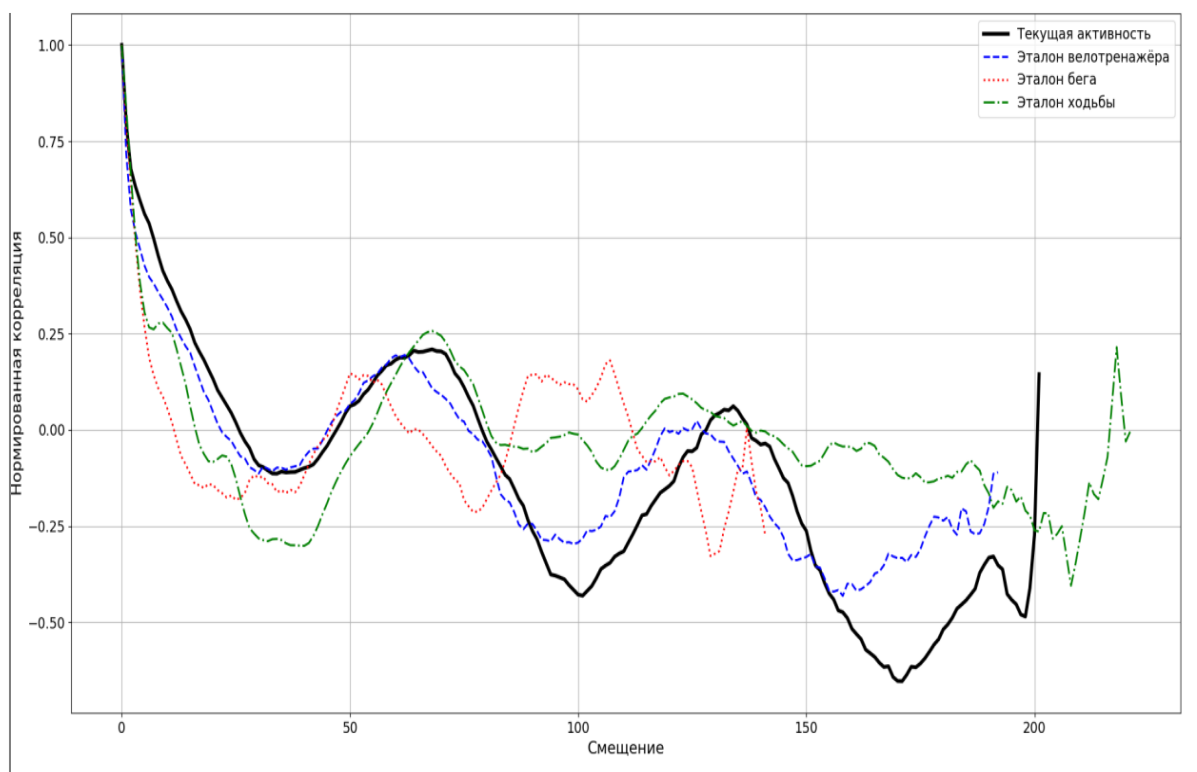


Рис. 2. График корреляционных функций с исследуемыми данными и эталонными данными

#### Разработка аппаратной части

Для получения данных о сердечной деятельности и физической активности была спрое-

ктирована микропроцессорная система. Носимое устройство выполняет сбор данных с акселерометра, кардиографа и передает полученные данные по сети Bluetooth.

Микропроцессорная система для сбора данных должна содержать управляющий микроконтроллер, имеющий возможность обмена данными по протоколам UART и I<sup>2</sup>C, датчик-акселерометр, датчик сердечного ритма, Bluetooth-модуль, аккумулятор, модуль зарядки аккумулятора и модуль преобразования напряжения (рис. 3). В основе проектируемого устройства лежит микроконтроллер STM32F401CCU6.

В качестве датчика, фиксирующего изменения данных координат и ускорения устройства, используется модуль MPU9250, реализующий 3-осевой акселерометр, 3-осевой гироскоп, 3-осевой магнетометр. Обмен данными между управляющим микроконтроллером и модулем MPU9250 осуществляется по интерфейсу I<sup>2</sup>C с частотой 100 кГц. В программе модуль акселерометра опрашивается с частотой 100 Гц.

Датчик сердечного ритма AD8232 предназначен для обработки сигналов электрокардиограммы. Расположенные на теле пациента электроды (рис. 4) обнаруживают небольшие изме-

нения потенциалов на коже, которые возникают вследствие деполяризации (резкое изменение электрического состояния клетки, когда отрицательный внутренний заряд клетки становится на короткое время положительным) сердечной мышцы при каждом ее сокращении. Важно закрепить электроды в правильном порядке, иначе можно получить искаженный сигнал. Выходным сигналом AD8232 является аналоговый сигнал, представляющий собой электрическую активность сердца. Для получения данных с датчика необходимо было оцифровать сигнал с использованием встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя.

Для зарядки аккумулятора формата 18650 используется модуль TP4056H. Выходное напряжение с аккумулятора от 3.7 В до 4.2 В. Чтобы питать микроконтроллер, акселерометр и кардиограф с помощью Li-Ion батареи, необходимо понизить напряжение до 3.3 В. Для понижения напряжения с 4.2 В до 3.3 В используем DC-DC преобразователь TPS63020.

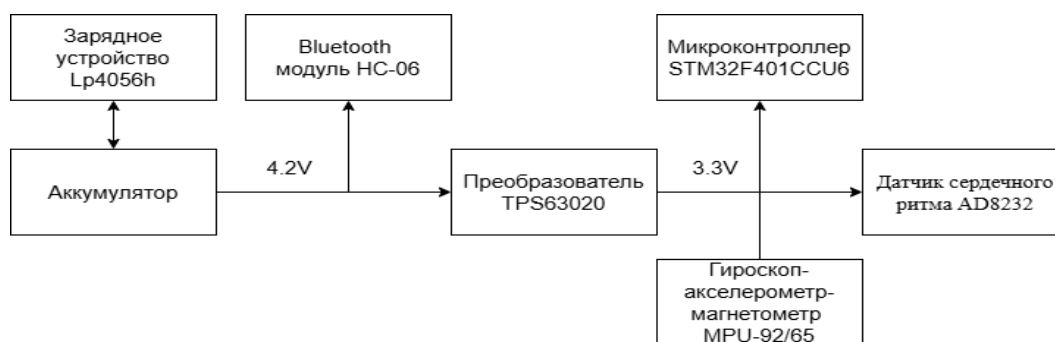


Рис. 3. Структурная схема устройства

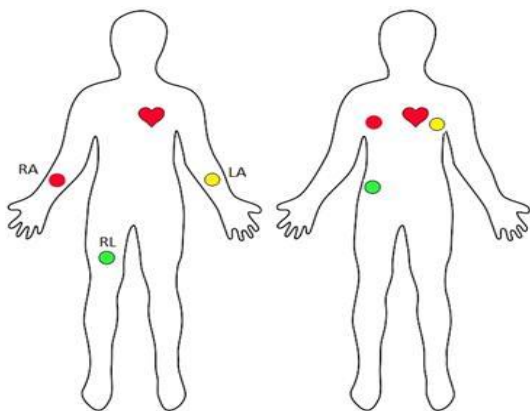


Рис. 4. Места крепления электродов для получения сигналов электрической активности сердца

#### Разработка программного обеспечения

Разработанная система включает в себя две основные программные составляющие: встро-

енное программное обеспечение для микроконтроллера и программное обеспечение для персонального компьютера, обеспечивающее обработку и визуализацию полученных данных.

Программа для микроконтроллера STM32F401CCU6 реализована на языке Си с использованием библиотеки HAL в среде разработки STM32CubeIDE. Она обеспечивает взаимодействие с датчиками акселерометра (MPU9250) и кардиографа (AD8232), а также передачу данных по интерфейсу UART на Bluetooth-модуль HC-06. Так же в микроконтроллере происходит подсчет в режиме реального времени частоты сердечных сокращений. Расчет пульса производится следующим образом.

Приведем часть кода для микроконтроллера, который использует метод скользящего среднего для расчета графиков и пульса:

```

temp=0;
hsens=adc[0];
for (int z=0; z<(num-1); z++)
{
    sadc[z]=sadc[z+1];
    temp=temp+sadc[z];
}
sadc[num-1]=hsens;
temp=temp+hsens;
avgh=temp/num;

temp=0;
hsenslow=adc[0];
for (int m=0; m<(numlow-1); m++)
{
    sadclow[m]=sadclow[m+1];
    temp=temp+sadclow[m];
}
sadclow[numlow-1]=hsenslow;
temp=temp+hsenslow;
avghlow=temp/numlow;
mashtab = (avgh - avghlow)*2 + avghlow;

```

Используем метод скользящего среднего для получения графиков «медленного» и «быстрого» скользящего среднего. Для «медленного» скользящего среднего выставляем время усреднения 300 периодов, для «быстрого» скользящего среднего – 20 периодов. Изучая пересечения «быстрого» скользящего среднего с «медленным» и рассчитывая последующие максимумы на графике «быстрого» скользящего среднего, вычисляем пульс.

Передача данных происходит в две строчки. Первая строчка содержит четыре значения: времени отправки, данные ускорения по оси X, данные ускорения по оси Y, данные ускорения по оси Z. Вторая строчка также имеет четыре переменных: время отправки, данные кардиограммы сердца, частоты сердечных сокращений и в качестве четвертого значения находится

цифра 0. По последней цифре «ноль» программа определяет, что данная строчка содержит данные сердечной активности. Между двумя посылками установлена задержка в 0,005 секунд.

Для последующего получения, обработки и визуализации данных разработана программа на языке Python. Для наглядной демонстрации графиков с данными, полученными с носимого устройства, используется библиотека Matplotlib. На основе полученных значений программа строит графики ускорений, кардиосигнала, частоты сердечных сокращений, что позволяет визуально и численно анализировать взаимосвязь между активностью и состоянием сердечной деятельности.

#### Экспериментальная проверка

В ходе экспериментального исследования сердечной деятельности по данным кардиограммы при различных активностях были изучены следующие физические активности:

- 1) покой в положении сидя (рис. 5);
- 2) ходьба (рис. 6);
- 3) занятия на велотренажере (рис. 7);
- 4) приседания (рис. 8).

Опишем, что изображено на рис. 5–8, используя в качестве примера данные, полученные при выполнении приседаний (рис. 8). Первые три графика отражают значения ускорений по осям Ax, Ay и Az, полученные с акселерометра. Они демонстрируют характерные колебания, соответствующие циклической физической активности – в данном случае приседаниям. Видно, что в активной фазе сигналы обладают регулярной структурой и имеют достаточно большую амплитуду, затем амплитуда резко снижается, что соответствует окончанию движения и переходу к состоянию покоя.

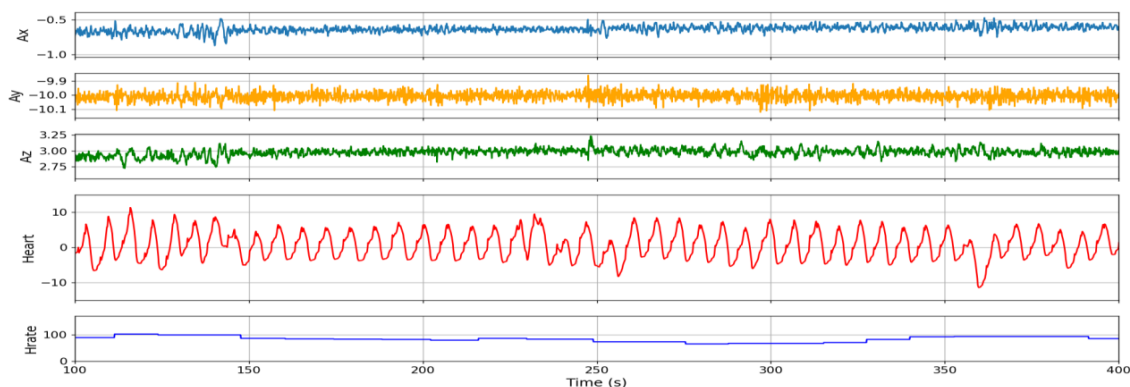


Рис. 5. Графики, полученные в состоянии покоя в положении сидя

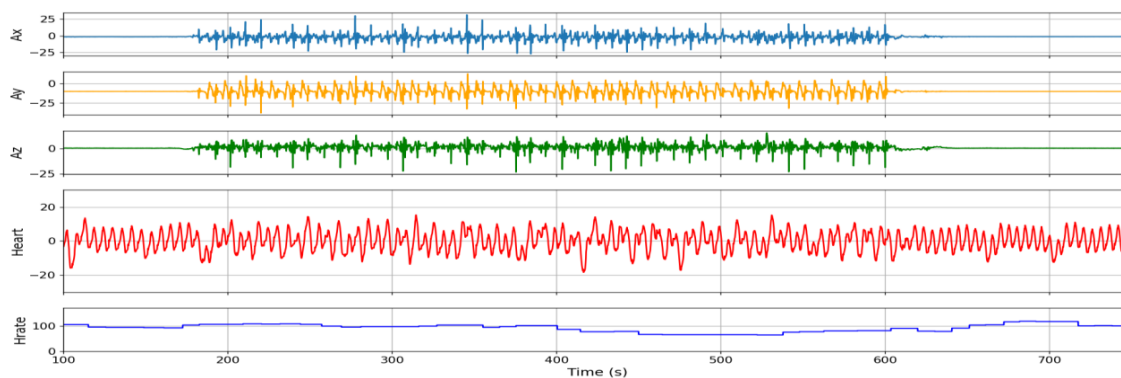


Рис. 6. Графики, полученные во время ходьбы

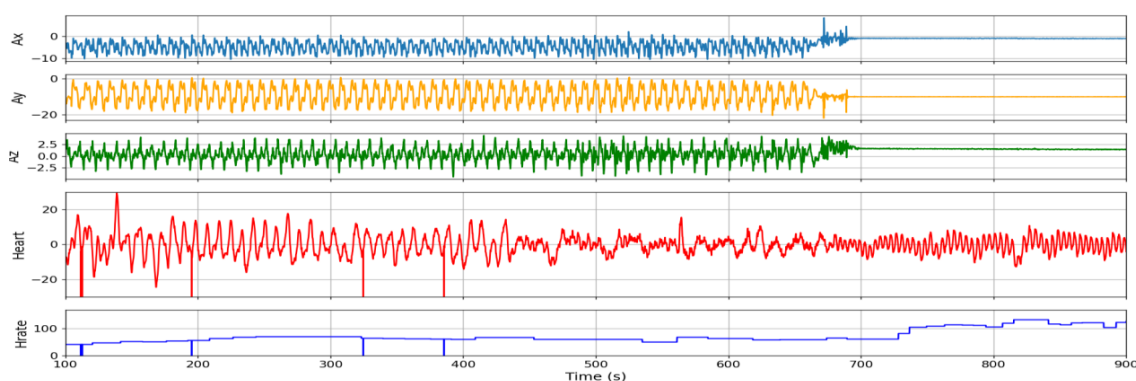


Рис. 7. Графики, полученные при занятии на велотренажере

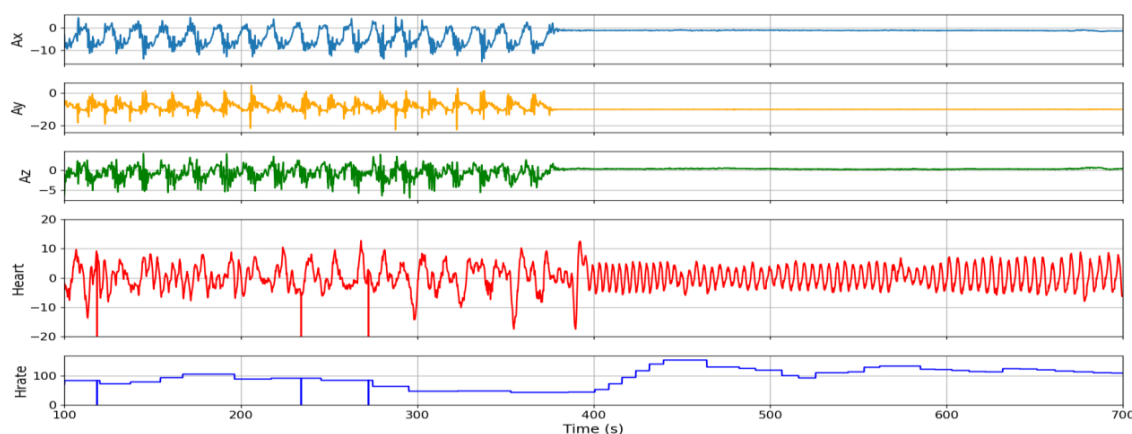


Рис. 8. Графики, полученные при приседании

Состояние покоя можно увидеть на рис. 8, где по временной шкале данная фаза начинается с 380 секунды.

Четвертый график, обозначенный как Heart, представляет собой электрокардиографический сигнал, снятый с датчика AD8232. На нем видны изменения в форме и частоте сердечных импульсов, вызванные физической нагрузкой. Для удаления лишних шумов и получения ка-

чественного результирующего графика применялся фильтр скользящего среднего.

Пятый график – Hrate. Он иллюстрирует динамику частоты сердечных сокращений (ЧСС), рассчитанную по интервалам между пиками кардиосигнала. На графике отчетливо видно повышение ЧСС в момент выполнения приседаний и постепенное снижение после завершения активности, что подтверждает кор-

ректную работу алгоритма и чувствительность системы к изменениям физической нагрузки.

### Заключение

В результате выполненного исследования была разработана и экспериментально проверена система для анализа сердечной деятельности человека в зависимости от выполняемой физической активности. Проведенные исследования подтвердили возможность идентификации различных типов физических активностей человека, а именно покой в положении сидя, ходьба, занятия на велотренажере и приседания. Созданное устройство, основанное на микроконтроллере STM32F401CCU6, датчиках MPU9250 и AD8232, позволило осуществлять одновременную регистрацию данных акселерометра и электрокардиографа, а также передачу информации по Bluetooth в режиме реального времени. Разработанная система обеспечила получение, обработку, визуализацию и расчет ключевых показателей, таких как тип физической активности, форма кардиосигнала и частота сердечных сокращений человека.

Полученные результаты подтверждают возможность дальнейшего использования разработанной системы в задачах медицинского мониторинга, оценки уровня физической подготовки и контроля функционального состояния в спорте и реабилитации. В дальнейшем развитие данного проекта может быть связано с добавлением алгоритмов машинного обучения, к примеру, метод Tiny Machine Learning [11], для автоматической классификации типов активности и прогнозирования состояния сердечно-сосудистой системы по совокупности параметров при помощи нейронной сети, работающей непосредственно на микроконтроллере, что расширит потенциал применения подобных систем в повседневной практике.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коптелова, И. А. Анализ эксплуатационных характеристик датчиков Холтера для разработки системы управления физическими нагрузками / И. А. Коптелова, А. В. Сомов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2023. – № 2 (43). – С. 21–23.
2. Design of a Wireless Sensor System with the Algorithms of Heart Rate and Agility Index for Athlete Evaluation / Meina Li, Youn Tae Kim // Sensors. – 2017. – Art. № 18. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29039763/> (date of access: 12.11.2025).
3. Emerging methods for measuring physical activity using accelerometry in children and adolescents with neuromotor disorders: a narrative review / Bailey A. Petersen, Kirk I. Erickson, Brad G. Kurowski [et al.] // Journal of Neuro-

Engineering and Rehabilitation. – 2024. – Art. № 31. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/378591274\\_Emerging\\_methods\\_for\\_measuring\\_physical\\_activity\\_using\\_accelerometry\\_in\\_children\\_and\\_adolescents\\_with\\_neuromotor\\_disorders\\_a\\_narrative\\_review](https://www.researchgate.net/publication/378591274_Emerging_methods_for_measuring_physical_activity_using_accelerometry_in_children_and_adolescents_with_neuromotor_disorders_a_narrative_review) (date of access: 12.11.2025).

4. Low frequency MEMS accelerometers in health monitoring – A review based on material and design aspects / Preeti Mallela, Koushik Guha, Krishna Baishnab [et al.] // Materials Today Proceedings. – 2019. – Art. № 18. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/334506823\\_Low\\_frequency\\_MEMS\\_accelerometers\\_in\\_health\\_monitoring\\_-\\_A\\_review\\_based\\_on\\_material\\_and\\_design\\_aspects](https://www.researchgate.net/publication/334506823_Low_frequency_MEMS_accelerometers_in_health_monitoring_-_A_review_based_on_material_and_design_aspects) (date of access: 12.11.2025).

5. Давыдов, В. К. Особенности механики рабочего прототипа реабилитационного экзоскелета нижних конечностей / В. К. Давыдов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 79. – С. 77–82.

6. Ижболдина, В. В. Анализ траектории движения конечности на основе данных с микромеханических датчиков / В. В. Ижболдина, В. Ю. Будков, А. В. Денисов // Научный результат. Информационные технологии. – 2018. – Т. 3, № 4. – С. 48–61.

7. Лях, В. И. Критерии и методы исследования двигательной активности человека / В. И. Лях, О. Г. Румба, А. А. Горелов // Теория и практика физической культуры. В поисках нового прорыва. – 2013. – № 10. – С. 99–104.

8. Сомов, А. В. Цифровая система мониторинга физических нагрузок / А. В. Сомов, А. И. Нефедьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 1 (50). – С. 45–49. – DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-45-49.

9. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник для вузов / Е. С. Вентцель. – 4-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2022. – 576 с.

10. Смит, С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / Стивен Смит ; пер. с англ. А. Ю. Линовича, С. В. Витязева, И. С. Гусинского. – М. : ДМК-Пресс, 2019. – 718 с.

11. Йодиче Дж. М. TinyML. Книги рецептов / Джан Марко Йодиче ; пер. с англ. Ю. В. Ревича. – М. : ДМК-Пресс, 2023. – 298 с.

### REFERENCES

1. Koptelova, I. A. Analysis of the operational characteristics of Holter sensors for the development of a physical activity management system // Koptelova I.A., Somov A.V. Energy and resource conservation: industry and transport. –2023. – № 2 (43). – Pp. 21–23.
2. Development of a wireless sensor system with algorithms for determining heart rate and agility index for evaluating athletes / Maina Lee, Yun Tae Kim // Sensors. – 2017. – Article No. 18. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29039763/> (accessed: 12.11.2025).
3. New Methods for Measuring Physical Activity Using Accelerometry in Children and Adolescents with Neuromotor Disorders: A Brief Review / Bailey A. Petersen, Kirk I. Erickson, Brad G. Kurowski [et al.] // Journal of Neuro-engineering and Rehabilitation. – 2024. – Article No. 31.
4. Low frequency MEMS accelerometers in health monitoring – A review based on material and design aspects / Preeti Mallela, Koushik Guha, Krishna Baishnab [et al.] // Materials Today Proceedings. – 2019. – Art. № 18. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/334506823\\_Low\\_frequency\\_MEMS\\_accelerometers\\_in\\_health\\_monitoring\\_-\\_A\\_re](https://www.researchgate.net/publication/334506823_Low_frequency_MEMS_accelerometers_in_health_monitoring_-_A_re)

view\_based\_on\_material\_and\_design\_aspects (date of access: 12.11.2025).

5. *Davydov, V. K.* Features of the Mechanics of the Working Prototype of a Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton / V. K. Davydov // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2023. – No. 79. – Pp. 77–82.

6. *Izboldina, V. V.* Analysis of the Limb Movement Path Based on Data from Micro-Mechanical Sensors / V. V. Izboldina, V. Yu. Budkov, and A. V. Denisov // Scientific Result. Information Technologies. – 2018. – Vol. 3, No. 4. – Pp. 48–61.

7. *Lyakh, V. I.* Criteria and Methods of Researching Human Motor Activity / V. I. Lyakh, O. G. Rumba, A. A. Gorelov // Theory and Practice of Physical Culture. In Search of a New Breakthrough. – 2013. – No. 10. – Pp. 99–104.

8. *Somov, A. V.* Digital system for monitoring physical activity / A.V. Somov, A.I. Nefediev // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2025. – No. 1 (50). – Pp. 45–49. – DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-45-49.

9. *Ventzel, E. S.* Theory of Probability : Textbook for Universities / E. S. Ventzel. – 4th ed., ster. – Moscow : Vyssh. shk., 20.

10. *Smith, S.* Digital Signal Processing. A Practical Guide for Engineers and Scientists / Stephen Smith ; translated from English by A. Yu. Linovich, S. V. Vityazev, and I. S. Gusinsky. - Moscow : DMK-Press, 2019. – 718 p.

11. *Yodice, J. M.* TinyML. Recipe Books / Gian Marco Yodice ; translated from English by Yu. V. Revich. – Moscow: DMK-Press, 2023. – 298 p.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026, доработана 30.01.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 12.01.2026, revised 30.01.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 629.359  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-53-60

Научная статья  
Original article

*А. С. Дьяков, Д. С. Федоров*

### ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ВСЕНАПРАВЛЕННЫМИ КОЛЕСАМИ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

✉ Дмитрий Сергеевич Федоров, dfedorov@bmstu.ru

**Аннотация.** Объектом исследования является транспортное средство с четырьмя всенаправленными колесами снаряженной массой 118,7 кг и грузоподъемностью 100 кг. Актуальной задачей является разработка динамической модели транспортного средства, учитывающей особенности контактного взаимодействия роликов колеса с опорной поверхностью, включая проскальзывание, сопротивление качению, взаимное влияние этих факторов, а также возможность одновременного контакта нескольких роликов, с целью формирования оптимальных законов управления движением.

Динамическая модель транспортного средства с всенаправленными колесами реализована в программном комплексе «Универсальный механизм», которая включает в себя совокупность следующих моделей: модель динамики корпуса, модель контактного взаимодействия с опорой, модель электроприводов и модель системы управления электроприводами.

Представлено описание законов управления движением транспортного средства, обеспечивающих простое, эргономичное управление скоростью и направлением движения, с помощью джойстика с двухкоординатными органами управления, через передачу сигнала по радиоканалу с частотой 2,4 ГГц.

Представленный закон управления позволяет задавать направление движения, радиус поворота, позиции центра поворота, скорость транспортного средства с всенаправленными колесами, с учетом одновременного воздействия на несколько органов управления.

**Ключевые слова:** мобильный робот, всенаправленное движение, Mecanum колесо, динамическая модель, пульт, система управления

**Для цитирования:** Дьяков А. С., Федоров Д. С. Динамическая модель транспортного средства с всенаправленными колесами. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 53–60. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-53-60

#### Информация об авторах:

**Алексей Сергеевич Дьяков** – д-р техн. наук, директор НОЦ «РОСТСЕЛЬМАШ-МГТУ», профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана

orcid: <https://orcid.org/0009-0005-7787-2354>

e-mail: Diakov\_as@bmstu.ru

**Дмитрий Сергеевич Федоров** – инженер НОЦ «РОСТСЕЛЬМАШ-МГТУ» МГТУ им. Н. Э. Баумана

orcid: <https://orcid.org/0009-0006-6141-7864>

e-mail: dfedorov@bmstu.ru

#### Вклад авторов:

**А. С. Дьяков** – определение цели и методологии работы, руководство ходом работы, экспертная оценка, редактирование текста рукописи.

**Д. С. Федоров** – разработка динамической модели, оформление материалов, написание текста рукописи.

*A. S. Dyakov, D. S. Fedorov*

## DYNAMIC MODEL OF A VEHICLE WITH MECANUM WHEELS

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia**

✉ Dmitrii S. Fedorov, dfedorov@bmstu.ru

**Abstract.** The object of study is a vehicle with four mecanum wheels, Its curb weight is 118.7 kg, its load capacity is 100 kg. The current task is to develop a dynamic model of the vehicle that takes into account the characteristics of the contact interaction of the wheel rollers with the supporting surface: slippage, rolling resistance, the mutual influence of these factors, as well as the possibility of simultaneous contact of several rollers, its purpose is to form optimal motion control laws.

The dynamic model of a vehicle with mecanum wheels is implemented in the Universal Mechanism software package, the model includes a set of models: a body dynamics model, a model of the contact interaction with the support, an electric drive model, an electric drive control system model.

A description of the vehicle motion control laws is provided. The laws ensure simple, ergonomic control of speed and direction of motion using a joystick with two-coordinate controls via a 2.4 GHz radio channel.

The control laws allow to set the direction of movement, the turning radius, the turning center positions, the speed of the vehicle with mecanum wheels, it takes into account the simultaneous impact on several controls.

**Keywords:** mobile robot, omnidirectional motion, mecanum wheel, dynamic model, remote control, control system

**For citation:** Dyakov A. S., Fedorov D. S. Dynamic model of a vehicle with mecanum wheels. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 1(54): 53–60. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-53-60.

### Information about the authors:

**Alexey S. Dyakov** – Dr. Sci. (Engineering), Prof. Bauman Moscow State Technical University  
e-mail: Diakov\_as@bmstu.ru

**Dmitrii S. Fedorov** – Engineer Bauman Moscow State Technical University  
e-mail: dfedorov@bmstu.ru

### Contribution of the authors:

**Alexey S. Dyakov** – determined the purpose and the methodology, managed the progress, provided expert assessment, edited the article.

**Dmitrii S. Fedorov** – developed the dynamic model, designed the materials, wrote the article.

### Введение

Всенаправленное колесо – это колесо, содержащее барабан и свободно вращающиеся ролики, которые устанавливаются на оси барабана под одинаковым углом  $30\text{--}60^\circ$  к оси вращения колеса и на равном удалении от нее; количество роликов достаточно для описания контактной окружности колеса. Всенаправленные колеса позволяют транспортному средству (ТС) реализовывать любой курс, повороты и траектории на плоской опоре.

Для исследований, направленных на повышение курсовой и траекторной устойчивости, точности позиционирования, управляемости, энергоэффективности, плавности хода, быстроходности ТС с всенаправленными колесами на этапе проектирования необходима модель, которая адекватно описывает его динамику. Верификация существующих моделей по динамическим, силовым или энергетическим параметрам не проводилась. В работах отечественных авторов [1–3] (и в других их работах) описываются динамические модели транспортных средств с всенаправленными колесами. В этих работах упоминается отклонение их моделей от ожидае-

мого курса при некоторых маневрах в процессе моделирования движения или при испытаниях. Отклонения могут быть вызваны упрощенными моделями контактного взаимодействия с опорным основанием, не учитывающими проскальзывание, сопротивление качению роликов и колеса, взаимную зависимость проскальзывания и сопротивления качению, одновременный контакт с опорой нескольких роликов. Данная работа является продолжением разработки динамической модели ТС с Mecanum колесами [4], которая учитывала близкие к реальным конструкцию колеса и контактное взаимодействие; модель была доработана по результатам разработки и испытаний опытного образца.

Существует ряд работ направленных на разработку систем автономной навигации, но также актуальна разработка рациональных и эргономичных систем управления с пульта. Например, в недавних работах [5–7] представлено управление, которое не позволяет реализовать любой курс ТС с возможностью поворота вокруг любого направления или реализовать скорость, пропорциональную воздействиям на органы управления.

### Описание объекта исследования

Объектом исследования является транспортное средство массой 118,7 кг, с двигателем в виде четырех всенаправленных колес (рис. 1). ТС может применяться в качестве вы-

сокоманевренного внутрицехового и складского транспортного средства, оно управляется оператором в зоне прямой видимости с помощью носимого пульта. Основные характеристики ТС с всенаправленным и колесами представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры транспортного средства с всенаправленными колесами

Класс транспортного средства	легкое робототехническое ТС
Масса, кг	118,7
Грузоподъемность, кг	100
Максимальная скорость движения, м/с	2
Длина x Ширина x Высота, м	1,185 x 0,850 x 0,375
Запас хода, км	15
Тип привода	Индивидуальный электропривод
Передаточное число редуктора	30
Мощность электродвигателя, Вт	400
Диаметр всенаправленного колеса, м	0,330
Ширина всенаправленного колеса, м	0,165
Число роликов	10
Каналы дистанционного управления	3 радиоканала 2,4ГГц



Рис. 1. Транспортное средство с всенаправленными колесами

### Динамическая модель ТС с всенаправленными колесами

Динамическая модель транспортного средства с всенаправленными колесами создана в программном комплексе (ПК) автоматизированного анализа динамики систем тел «Универсальный механизм» [8]. Моделирование заключается в создании системы твердых тел и системы шарниров (связей) для каждого из тел, приложения активных и реактивных силы к созданной системе. Уравнения динамики автоматизировано синтезируются с использова-

нием формализма Ньютона – Эйлера в виде дифференциально-алгебраических уравнений. Уравнения движения систем тел в общем случае можно представить в следующем виде (1):

$$\begin{cases} m\ddot{s} = \sum F_i; \\ J\ddot{\phi} = \sum F_{ni} \times r_i + \sum M_j + J\dot{\phi}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  – диагональная матрица масс тела;  $s(X, Y, Z)^T$  – вектор координат центра масс корпуса в неподвижной системе координат;  $F_i$  – векторы внешних сил, действующих на точку,

заданный в неподвижной системе координат;  $J$  – диагональная матрица главных центральных моментов инерции тела;  $\varphi(\alpha, \beta, \gamma)^T$  – вектор поворота тела;  $F_{ni}$  – векторы внешних сил, действующих на точку, заданный в подвижной системе координат;  $r_i$  – радиус-вектор точки при-

ложения силы в подвижной системе координат;  $M_j$  – вектор внешних моментов, действующих на точку, заданный в подвижной системе координат;  $J\dot{\varphi}$  – вектор гироскопических сил.

Основные характеристики модели ТС представлены в табл. 2.

Таблица 2

Геометрические и инерционные параметры модели ТС

Параметр	Значение
Снаряженная масса, кг	118,7
Масса корпуса ТС, кг	75
Масса барабана колеса, кг	6,7
Масса ролика, кг	0,40
Число роликов на колесе $n$ , шт	10
Диаметр обода колеса $D$ , м	0,330
Ширина следа всенаправленного колеса $h$ , м	0,112
Радиус центрального сечения ролика, м	0,030
Радиус торцевого сечения ролика, м	0,180

В модели создана система твердых тел, которая включает в себя ролики, барабаны колес, корпус ТС и опоры (рис. 2, *a*). Каждый ролик связан с барабаном колеса вращательным шарниром. Барабан колеса связан с корпусом ТС вращательным шарниром. Корпус ТС связан с опорой шарниром с шестью степенями свободы. Контактное взаимодействие роликов с опо-

рой моделируется силовыми элементами «окружность–плоскость» из библиотеки ПК «Универсальный механизм», эти элементы предназначены для представления контактных сил катящихся объектов.

С каждым роликом связаны семь «окружностей-плоскостей» (показаны красным на рис. 2, *b*).

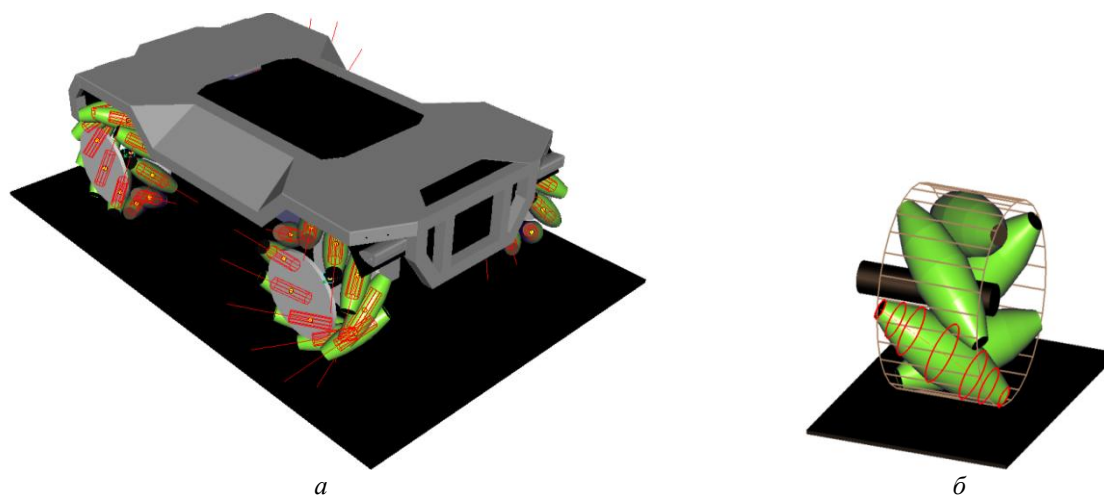


Рис. 2. Динамическая модель платформы с всенаправленными колесами: *a* – внешний вид с шарнирами роликов; *b* – всенаправленное колесо и окружности, моделирующие контактное взаимодействие

На рис. 3 представлена схема внешних сил и моментов, действующих на ролик с осью (красные) и на корпус всенаправленного колеса

(синие). Эквивалентная система сил смоделирована и решена программными средствами ПК «Универсальный механизм».

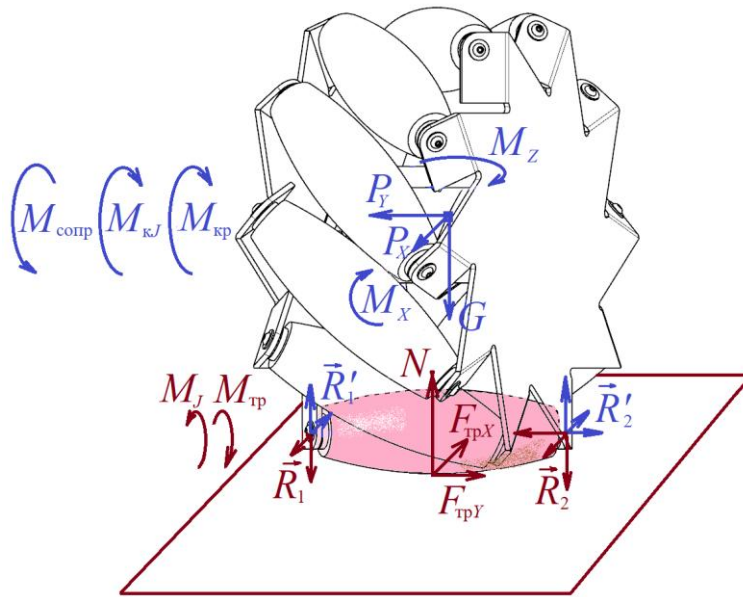


Рис. 3. Схема сил и моментов, действующих на всенаправленное колесо

На ролик в контакте с опорой действуют нормальная реакция  $N$  и касательная реакция  $F_{тр}$  (в виде проекций  $F_{трx}$  и  $F_{трy}$ ). В местах крепления оси ролика к дискам на ролик действуют векторные реакции  $R_1$  и  $R_2$  (в виде проекций). На ролик при качении действует инерционный момент  $M_J$  и момент сопротивления качению ролика  $M_{тр}$ . Инерционный момент  $M_J$  определяется по формуле (2):

$$M_J = J_{\text{ролик}} \cdot \omega_{\text{ролик}}, \quad (2)$$

где  $J_{\text{ролик}}$  – момент инерции ролика,  $\omega_{\text{ролик}}$  – угловая скорость ролика относительно колеса.

Вектор момента сопротивления качению ролика определяется по формуле (3):

$$\vec{M}_{тр} = -\text{sign}(\vec{\omega}_{\text{ролик}}) \cdot M_{тр}, \quad (3)$$

где  $M_{тр} = 0,35 \text{ Н}\cdot\text{м}$  – фрикционный момент трения, вызванный переходной посадкой в подшипнике скольжения.

На корпус колеса со стороны ролика действуют векторные реакции  $R'_1$  и  $R'_2$  (в виде проекций). Также на корпус колеса действуют силы со стороны корпуса ТС и собственные силы: вертикальная сила – сила тяжести  $G$  и сила инерции  $P$  (в виде проекций  $P_x$  и  $P_y$ ). На колесо при качении действует крутящий момент  $M_{кр}$ , инерционный момент  $M_{кж}$  и момент сопротивления качению колеса  $M_{сопр}$ , реактивный момент со стороны корпуса ТС (в виде проекций  $M_x$  и  $M_z$ ). Инерционный момент  $M_{кж}$  определяется по формуле (4):

$$M_{кж} = (J_k + n \cdot J_{\text{ролик}}) \cdot \omega, \quad (4)$$

где  $J_k$  – момент инерции корпуса колеса,  $\omega$  – угловая скорость колеса.

Момент сопротивления качению колеса  $M_{сопр}$  определяется по формуле (5):

$$M_{сопр} = f_0 \cdot \frac{D}{2} \cdot N, \quad (5)$$

где  $f_0 = 0,05$  – коэффициент сопротивления качению,  $N$  – нормальная реакция.

#### Модель контактного взаимодействия роликов с опорой

Контактное взаимодействие в программном комплексе «Универсальный механизм» реализовано в виде модели податливого контакта, при котором допускается внедрение контактирующих элементов тела в опорную поверхность. При наличии контакта рассчитываются две силы: нормальная реакция  $N$  упруго-диссипативно зависящая от глубины и скорости внедрения, и касательная реакция  $F_{тр}$  [8]. Упруго-диссипативная характеристика контакта задана коэффициентом жесткости  $c = 1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$  и коэффициентом диссипации  $\mu = 1 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$ . Нормальная реакция определяется по формуле [8] (6):

$$N = c \cdot \Delta + \mu \cdot \dot{\Delta}, \quad (6)$$

где  $\Delta$  – внедрение ролика в опорное основание (внедрение «окружностей-плоскостей» в опорное основание).

Касательная реакция направлена против скорости скольжения, ее величина определяется по формуле (7):

$$F_{тр} = \psi \cdot N, \quad (7)$$

где  $\psi$  – коэффициент реакции в пятне контакта. В программном комплексе «Универсальный механизм» коэффициент реакции в пятне кон-

такта задается кусочно-линейной функцией в координатах  $\psi(v_s)$  (рис. 4), где  $v_s$  – скорость скольжения в пятне контакта.

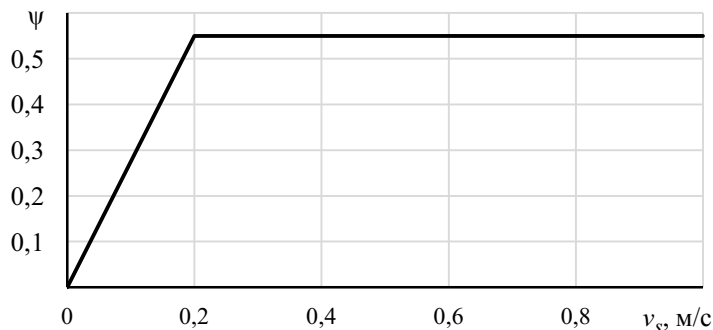


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $\psi$  от скорости скольжения

### Модель привода

Привод всенаправленного колеса (электродвигатель с редуктором) моделируется естественной механической характеристикой электродвигателя, приведенной к валу колеса. Характеристика представлена на рис. 5, а – в виде зависимости крутящего момента от частоты вращения. По текущему значению частоты вращения вала колеса  $n$  определяется максимальный доступный крутящий момент  $M_{кр\ max}$ . Текущее значение крутящего момента  $M_{кри}$  на выходном валу (на валу  $i$ -го колеса) определяется по формуле (8):

$$M_{кри} = M_{кр\ max}(n) \cdot Y_i, \quad (8)$$

где  $Y_i \in [-1; 1]$  – управляющее воздействие, вычисляется в модели системы управления.

В модели, как и на опытном образце, при  $Y_i < 0$  реализовано рекуперативное торможение электродвигателями.

Мощность тока электродвигателя  $P_{э}$  (электрическая мощность) вычисляется по формуле (9):

$$P_{эi} = \frac{P_{Mi}}{\eta(P_{Mi})}, \quad (9)$$

где  $\eta(P_{Mi})$  – зависимость КПД привода от механической мощности (рис 5, б),  $P_{Mi}$  – механическая мощность на колесе, определяется по формуле (10):

$$P_{Mi} = M_{кри} \cdot \omega_i, \quad (10)$$

где  $\omega_i$  – угловая скорость вала  $i$ -го омни-колеса (выходного вала  $i$ -го редуктора).

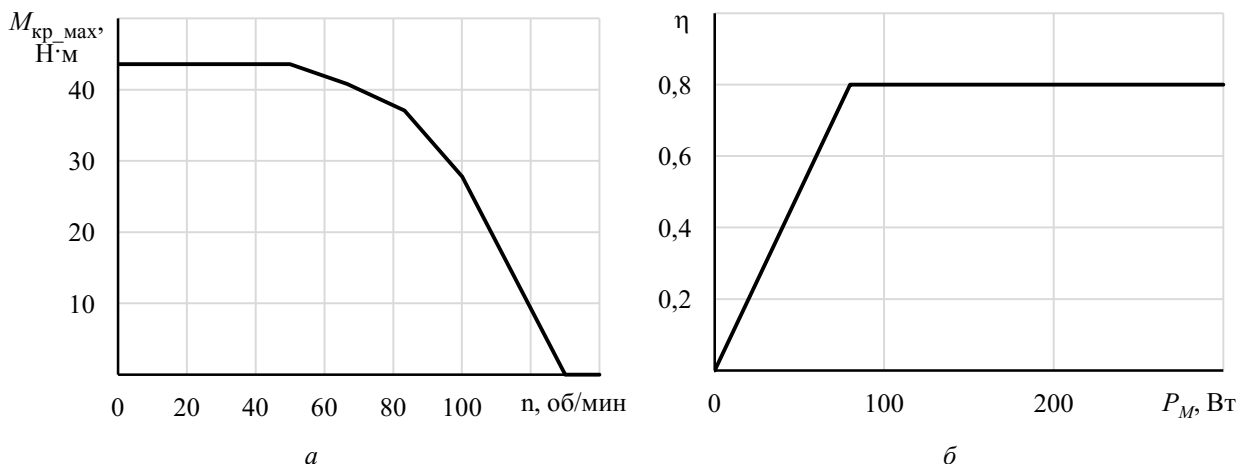


Рис. 5. Характеристики привода:  
а – механическая характеристика электродвигателя, приведенная к выходному валу редуктора;  
б – зависимость КПД привода от механической мощности

### Модель системы управления

На вход модели системы управления подаются три входных воздействия, которые моделируют сигналы с органов управления (рис. 6):

$h_{\text{прямо}} \in [-1; 1]$  – входное воздействие, отвечающее за фронтальное движение, положительное направление отсчета совпадает с направлением «вперед»;

$h_{\text{бок}} \in [-1; 1]$  – входное воздействие, отве-

чающее за боковое движение, положительное направление отсчета совпадает с направлением «вправо»;

$h_{\text{поворот}} \in [-1; 1]$  – входное воздействие, отвечающее за поворотное движение, положительное направление отсчета совпадает с направлением «по часовой стрелке».

На рис. 6 представлены воздействия управления и их влияние на движение модели ТС.

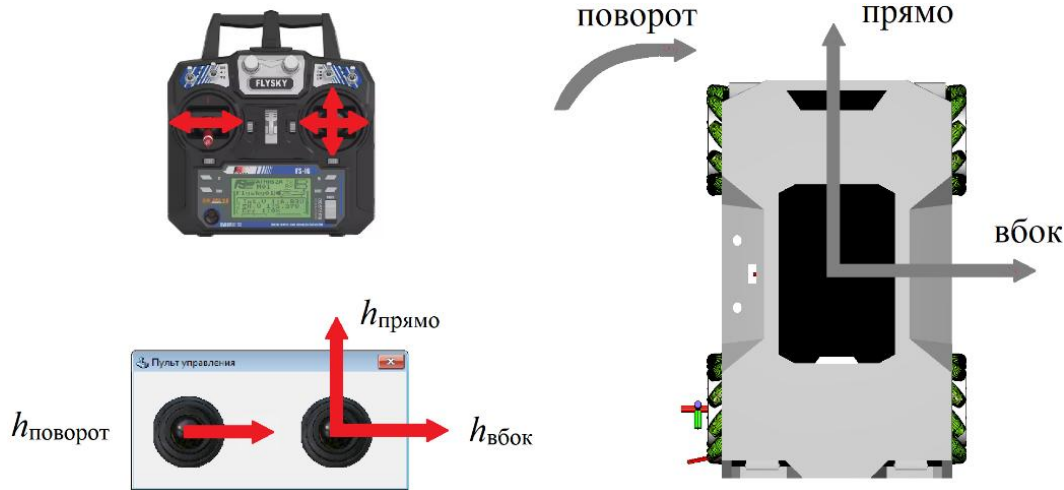


Рис. 6. Входные воздействия управления

На основе входных воздействий формируются задающие воздействия для каждого электромотора (11):

$$\begin{cases} h_{\text{ПП}} = K \cdot (h_{\text{прямо}} - h_{\text{бок}} - h_{\text{поворот}}), \\ h_{\text{ПЛ}} = K \cdot (h_{\text{прямо}} + h_{\text{бок}} + h_{\text{поворот}}), \\ h_{\text{ЗП}} = K \cdot (h_{\text{прямо}} + h_{\text{бок}} - h_{\text{поворот}}), \\ h_{\text{ЗЛ}} = K \cdot (h_{\text{прямо}} - h_{\text{бок}} + h_{\text{поворот}}), \end{cases} \quad (11)$$

где  $h_{\text{пп}} \in [-1; 1]$  – задающее воздействие переднего правого электромотора,  $h_{\text{пл}} \in [-1; 1]$  – задающее воздействие переднего левого электромотора,  $h_{\text{зп}} \in [-1; 1]$  – задающее воздействие заднего правого электромотора,  $h_{\text{зл}} \in [-1; 1]$  – задающее воздействие заднего левого электромотора,  $K$  – коэффициент коррекции, который вводится для обеспечения значений всех задающих воздействий в пределах  $[-1; 1]$  и для

задания соответствия значений задающих воздействий величине наибольшего управляющего воздействия.

Коэффициент коррекции  $K$  определяется по формуле (12):

$$K = \frac{\max(|h_{\text{прямо}}|, |h_{\text{бок}}|, |h_{\text{поворот}}|)}{(|h_{\text{прямо}}| + |h_{\text{бок}}| + |h_{\text{поворот}}|)}. \quad (12)$$

Контроллер электромотора опытного образца осуществляет векторное (полеориентированное, FOC) управление электромотором по задающему воздействию; в модели управление электромотором осуществляется упрощенно – с помощью ПИД-регулятора. Задающее воздействие  $h_i$  (равно одному из  $h_{\text{пп}}$ ,  $h_{\text{пл}}$ ,  $h_{\text{зп}}$ ,  $h_{\text{зл}}$ ) подается на вход ПИД-регулятора, который формирует управляющее воздействие на электромотор по формуле (13):

$$Y_i = K_{\text{П}} \cdot (h_i \cdot \omega_{\text{max}} - \omega_i) + K_{\text{И}} \cdot \int_0^t (h_i \cdot \omega_{\text{max}} - \omega_i) dt + K_{\text{Д}} \cdot \frac{d(h_i \cdot \omega_{\text{max}} - \omega_i)}{dt}, \quad (13)$$

где  $\omega_{\text{max}} = (\pi \cdot n_{\text{max}} / 30)$  – максимальная возможная угловая скорость вала колеса, которая зависит от выбранного режима движения,  $n_{\text{max}}$  –

максимальная частота вала колеса, при которой крутящий момент не равен нулю на выбранном режиме движения,  $K_{\text{П}} = 0$  – пропорциональный

коэффициент регулятора,  $K_{И} = 0,24$  – интегральный коэффициент регулятора,  $K_{Д} = 0,18$  – дифференциальный коэффициент регулятора.

Представленный закон управления позволяет задавать направление движения, радиус поворота, позиции центра поворота, скорость транспортного средства с всенаправленными колесами, воздействуя на два джойстика: один однокоординатный и один двухкоординатный. Закон управления протестирован при управлении опытным образцом с пульта, отмечена его эргономичность.

### Заключение

Разработан и изготовлен опытный образец ТС с всенаправленными колесами. Разработана новая динамическая модель ТС с всенаправленными колесами, которая отличается тем, что учитывает проскальзывание в контакте роликов с опорой, сопротивление при качении роликов, взаимную зависимость проскальзывания и сопротивления качению, одновременный контакт с опорой нескольких роликов.

Разработан рациональный закон управления движением с пульта, он был успешно апробирован на опытном образце и показал свою практическую пригодность и удобство для оператора.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Kilin, A. A.*, et al. Experimental investigations of a highly maneuverable mobile omniwheel robot // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2017. – Vol. 14, № 6. – P. 1–9.
2. *Adamov, B. I.*, Saypulaev G.R. Research on the Dynamics of an Omnidirectional Platform Taking into Account Real Design of Mecanum Wheels (as Exemplified by KUKA youBot) // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 16, № 2. – P. 291–307.
3. *Радкевич, А. А.* Исследование динамических характеристик голономного робота с колесами типа меканум на основе 3D-параметрической имитационной модели / А. А. Радкевич, С. А. Павлюковец // *Наука и техника*. – 2024. – Т. 23, № 5. – С. 359–369.

4. *Дьяков, А. С.* Геометрия, кинематика и динамика Mecanum колеса. Неустановившееся движение Mecanum транспортера / А. С. Дьяков, Д. С. Федоров // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2024. – Т. 18, № 2. – С. 139–148.

5. *Mareail, M.*, Wildan J.F., Afkarean M.R. Multi-microcontroller system for Mecanum robots with gripper-shooter mechanisms // *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. – 2025. – Vol. 14, № 2. – P. 181–190.

6. *Hadisujoto, B.*, et al. Development of 3D Printed Autonomous Warehouse Robot Using Mecanum Wheel and Robot Arm. // *JASAT*. – 2025. – Vol. 6. – P. 57–64.

7. *Thongpance, N.*, Chotikunnan P. Design and Construction of Electric Wheelchair with Mecanum Wheel // *Journal of Robotics Control (JRC)*. – 2023. – Vol. 4, № 1. – P. 71–82.

8. Программный комплекс «Универсальный механизм». – URL: <http://www.umlab.ru> (дата обращения 24.11.2025).

### REFERENCES

1. *Kilin, A. A.*, et al. Experimental investigations of a highly maneuverable mobile omniwheel robot // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017. Vol. 14, № 6. P. 1-9.
2. *Adamov, B. I.*, Saypulaev G.R. Research on the Dynamics of an Omnidirectional Platform Taking into Account Real Design of Mecanum Wheels (as Exemplified by KUKA youBot) // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2020. Vol. 16, № 2. P. 291-307.
3. *Radkevich, A. A.*, Pavlyukovets S.A. Investigation of dynamic characteristics of a holonomic robot with mecanum wheels based on a 3D parametric simulation model // *Science and technology*. 2024. Vol. 23, № 5. P. 359-369.
4. *Dyakov, A. S.*, Fedorov D.S. Geometry, kinematics and dynamics of the Mecanum wheel. Unstable motion of the Mecanum vehicle. *Izvestiya MGTU «МАМИ»*. 2024. Vol. 18? № 2. P. 139–148.
5. *Mareail, M.*, Wildan J.F., Afkarean M.R. Multi-microcontroller system for Mecanum robots with gripper-shooter mechanisms // *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. 2025. Vol. 14, № 2. P. 181-190.
6. *Hadisujoto, B.*, et al. Development of 3D Printed Autonomous Warehouse Robot Using Mecanum Wheel and Robot Arm. // *JASAT*. 2025 Vol. 6. P 57-64.
7. *Thongpance, N.*, Chotikunnan P. Design and Construction of Electric Wheelchair with Mecanum Wheel // *Journal of Robotics Control (JRC)*. 2023 vol. 4, № 1. P. 71–82.
8. Universal mechanism 9. User manual [internet] cited: 24.11.2025. Available from: <https://www.umlab.ru>.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026, доработана 10.02.2026, подписана в печать 13.02.2026

The article was submitted 03.02.2026, revised 10.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 629.3.017.5-597.5  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-61-74

Научная статья  
Original article

*М. П. Малиновский*<sup>1,2</sup>, *Е. С. Смолко*<sup>1,2</sup>, *М. А. Болтовский*<sup>2</sup>, *С. Б. Дорохов*<sup>2</sup>  
**СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ТОРМОЗНОГО ПРИВОДА**

<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный  
технический университет (МАДИ), Москва, Россия  
<sup>2</sup>ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

✉ Михаил Павлович Малиновский, ntbmadi@gmail.com

**Аннотация.** Сжатый воздух в настоящее время используется в различных сферах жизнедеятельности человека, например, в промышленности, строительстве, на транспорте, а также для решения повседневных бытовых задач. Пневматический тормозной привод применяется на грузовых автомобилях и автопоездах уже более века, а на железной дороге – около полутора сотен лет. Но так было далеко не всегда: человек «приручил» сжатый воздух всего четыре века назад. И несмотря на все большее распространение методов вычислительной гидрогазодинамики, так называемого CFD-моделирования (Computational Fluid Dynamics), актуальными остаются задачи уточнения методик расчета динамических характеристик пневматических приводов и их экспериментального подтверждения.

**Ключевые слова:** сжатый воздух, компрессор, пневмоавтоматика, автотранспортные средства, системы управления, быстроедействие, диаграмма функций давления

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Испытательному центру продукции автомобилестроения (ИЦПА) ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» за проведенные исследования.

**Финансирование:** исследования выполнены в рамках научно-исследовательского проекта Центра «Специальные транспортные средства» ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

**Для цитирования:** Малиновский М. П., Смолко Е. С., Болтовский М. А., Дорохов С. Б. Стендовые исследования статических характеристик пневматического тормозного привода. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 61–74. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-61-74.

**Информация об авторах:**

**Михаил Павлович Малиновский** – канд. техн. наук, доцент кафедры тягачей и амфибийных машин МАДИ, главный специалист отдела моделирования и общей интеграции специальных транспортных средств ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

<https://orcid.org/0000-0001-7812-5653>

scopus id: 57193743128

e-mail: ntbmadi@gmail.com

**Евгений Сергеевич Смолко** – аспирант кафедры тягачей и амфибийных машин МАДИ; инженер-конструктор отдела компоновки бортовых систем специальных транспортных средств ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

SPIN-код: 3987-8398

e-mail: evgeny.smolko@nami.ru

**Михаил Аркадьевич Болтовский** – младший научный сотрудник лаборатории тормозных систем Испытательного центра продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

e-mail: mikhail.boltovskiy@nami.ru

**Сергей Борисович Дорохов** – начальник лаборатории тормозных систем Испытательного центра продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

e-mail: sergey.dorokhov@nami.ru

**Вклад авторов:**

**М. П. Малиновский** – разработка идеи и общей концепции исследования, проведение эксперимента, интерпретация результатов, написание статьи, редактирование.

**Е. С. Смолко** – проведение эксперимента, сбор и анализ данных, оформление материалов.

**М. А. Болтовский** – разработка экспериментальной установки.

**С. Б. Дорохов** – организация экспериментальных исследований.

*M. P. Malinovsky*<sup>1,2</sup>, *E. S. Smolko*<sup>1,2</sup>, *M. A. Boltovsky*<sup>2</sup>, *S. B. Dorokhov*<sup>2</sup>

**BENCH STUDIES OF THE STATIC CHARACTERISTICS  
OF A PNEUMATIC BRAKE DRIVE**

<sup>1</sup>Moscow automobile and road construction state technical university (MADI), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise “Central Scientific Research Automobile  
and Automotive Engines Institute” (FSUE “NAMI”), Moscow, Russia

✉ Mikhail P. Malinovsky, ntbmadi@gmail.com

**Abstract.** Compressed air is currently used in various areas of human activity, such as industry, construction, transportation, and everyday household tasks. Pneumatic brake systems have been used in trucks and road trains for over a century, and on railroads for about 150 years. But this wasn't always the case: humans "tamed" compressed air only four centuries ago. And despite the increasing use of computational fluid dynamics (CFD) modeling, the need to refine the methods for calculating the dynamic characteristics of pneumatic drives and their experimental confirmation remain urgent.

**Keywords:** compressed air, compressor, pneumatic automation, motor vehicles, control systems, speed of action, pressure function diagram

**Acknowledgments:** the authors express their gratitude to the Automotive Products Testing Center of the State Research Center of the Russian Federation FSUE "NAMI" for the research conducted.

**Funding:** the research was carried out within the framework of research projects of the Center for Special Vehicles of the State Research Center of the Russian Federation FSUE "NAMI".

**For citation:** Malinovsky M. P., Smolko E. S., Boltovsky M. A., Dorokhov S. B. Bench studies of the static characteristics of a pneumatic brake drive. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 1(54): 61–74. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-61-74.

**Information about the authors:**

**Mikhail P. Malinovsky** – PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Tractors and Amphibious Vehicles at MADI, Chief Specialist of the Department of Modeling and General Integration of Specialized Vehicles at the State Research Center of the Russian Federation FSUE "NAMI"

e-mail: ntbmadi@gmail.com

**Eugeny S. Smolko** – postgraduate student of the Department of Tractors and Amphibious Vehicles at MADI; design engineer of the Department of On-Board Systems Layout for Special Vehicles at the State Research Center of the Russian Federation FSUE "NAMI"

e-mail: evgeny.smolko@nami.ru

**Mikhail A. Boltovsky** – junior researcher at the Brake Systems Laboratory of the Automotive Products Testing Center at the State Research Center of the Russian Federation FSUE "NAMI"

e-mail: mikhail.boltovskiy@nami.ru

**Sergey B. Dorokhov** – head of the Brake Systems Laboratory of the Automotive Products Testing Center at the State Research Center of the Russian Federation FSUE "NAMI"

e-mail: sergey.dorokhov@nami.ru

**Contribution of the authors:**

**Mikhail P. Malinovsky** – idea development and methodology design, conducting experiments, result interpretation, writing the article, final approval of the version for publication.

**Eugeny S. Smolko** – conducting experiments, data collection and analysis, material preparation.

**Mikhail A. Boltovsky** – experimental setup design.

**Sergey B. Dorokhov** – experimental research organization.

Что первично – изучение человеком физических законов и явлений или их применение для решения конкретных практических задач – вопрос философский. История науки и техники знает как первый вариант развития событий, так и второй, а иногда указанные два процесса идут навстречу друг другу.

Первые попытки людей упорядочить водоснабжение в цивилизованных поселениях относятся к V тысячелетию до н. э. Сначала решались проблемы каптажных источников, безнапорного подвода воды потребителям и преодоления разности высот [1]. Ктесибий, или Ктезибий (греч. Κτησιβίος, 285–222 гг. до н. э.),

древнегреческий механик и математик, являлся автором научных трактатов о теории упругости воздуха и изобретателем первого двухцилиндрового насоса, содержащего две пары всасывающих и напорных клапанов, рычаг-балансир для ручного привода и направленное вверх регулируемое сопло [2]. Сохранившийся экземпляр подобного насоса находится в Национальном археологическом музее Мадрида. К сожалению, сочинение Ктесибия «*Hydraulica*» с изложением основ пневматики было уничтожено во время крупного пожара в Александрийской библиотеке (48–47 гг. до н. э.) [3], и конструкция насоса Ктесибия была описана

в I в. до н. э. древнегреческим математиком Героном Александрийским (др.-греч. Ἡρόων ὁ Ἀλεξανδρεὺς) в сочинении «Пневматика» (греч. Πνευματικά), а затем древнеримским архитектором Витрувием (полное имя – Марк Витрувий Поллион, лат. Marcus Vitruvius Pollio; ок. 80–70 гг. до н. э. – после 13 г. до н. э.) в труде «Десять книг об архитектуре» (лат. De architectura-librudecem) [4]. Насос Ктесибия применялся для тушения пожаров в течение двух тысяч лет [5] и включал все основные конструктивные элементы современного пожарного насоса ручного действия [6]. Принцип действия, разработанный Ктесибием, используется в современных двухдиафрагменных пневматических насосах, например, Directflo® испанской компании SAMOA Industrial, и ручных насосах, известных каждому велосипедисту [7].

Кроме пожарного насоса, Ктесибием были изобретены гидравлический орган – гидравлос, который первоначально приводился в движение двумя поршневыми насосами (один закачивал воздух внутрь, а другой подавал его к трубам) и имел резервуар с водой для выравнивания давления, а также – для батальных целей – камнеметатели и самострелы, действие которых было основано на силе сжатого воздуха и пружин из бронзы [3]. При натягивании тети-вы рычаги, вращавшиеся на осях, нажимали на поршни в воздушных камерах, и после выпуска стрелы сжатый воздух возвращал рычаги в исходное положение.

Серьезный прогресс в развитии пневматики как науки произошел в XVII веке. С середины XVI в. особую значимость в науке приобретают экспериментальные исследования. Активным пропагандистом использования в науке математики и экспериментальных исследований был профессор Парижского и Оксфордского университетов Роджер Бэкон (англ. Roger Bacon, ок. 1214–1292) [8]. Преобладанию индуктивного метода изложения соответствовали успехи экспериментальной физики того времени. Происходило тщательное количественное изучение отдельных явлений, установление экспериментальных фактов, частных закономерностей. Были изобретены приборы, позволяющие проводить точные весовые, температурные, оптические, электрические и магнитные измерения, и среди них – барометр [9].

Аристотель (греч. Ἀριστοτέλης, 384–322 гг. до н. э.) и перипатетики (его последователи, от греч. περι-πατέω – ходить кругом, прохаживать-

ся) утверждали, что вода поднимается за поршнем насоса потому, что «природа не терпит пустоты» [10]. Однако при решении вполне практической задачи – сооружении фонтанов – во Флоренции обнаружилось, что засасываемая насосами вода не поднимается выше 34 футов. Строители обратились за разъяснениями к Галилео Галилею (итал. Galileo Galilei, 15.02.1564–08.01.1642), но тот потерял зрение после смерти в возрасте 33 лет любимой старшей дочери Вирджинии, и за дело взялись два его ученика – Эванджелиста Торричелли (итал. Evangelista Torricelli, 15.10.1608–25.10.1647) и Винченцо Вивиани (итал. Vincenzo Viviani, 5.04.1622–22.09.1703). Уже после смерти Галилея, в 1643 г. они провели эксперимент, доказавший наличие давления атмосферного воздуха. Стекланную трубку длиной около 1 м, запаянную с одного конца, наполняли ртутью и переворачивали, погружая открытым концом в чашу, заполненную ртутью на 2...3 см. Уровень ртути в трубке устанавливался на высоте «в один локоть с четвертью и еще палец» [11], что позже оценили примерно как 760 мм от поверхности ртути в чаше.

Осмысливая результаты эксперимента, Торричелли сделал два вывода. Во-первых, пространство над ртутью в трубке остается пустым – позже его назовут «торричеллиевой пустотой» [12]. Во-вторых, ртуть не выливается из трубки обратно в сосуд потому, что «мы живем на дне океана, образованного элементом воздуха, который, как неоспоримо доказал опыт, имеет вес» [13]. При этом атмосферное давление равно давлению столба ртути в трубке, но Торричелли не учел, что полученная величина является нормальной только на данной высоте от уровня моря и только при конкретных погодных условиях. Проведенный опыт лег в основу принципа действия барометра, который Торричелли изобрел в 1644 г., а единица измерения атмосферного давления в мм ртутного столба применяется до сих пор в ежедневном прогнозе погоды. Однако на тот момент наличие атмосферного давления многим казалось совершенно невозможным, и выводы Торричелли не сразу были приняты учеными.

Узнав в конце 1646 г. от знакомого своего отца о торричеллиевой трубке, французский ученый Блез Паскаль (фр. Blaise Pascal, 19.06.1623–19.08.1662) повторил его опыт, а затем видоизменил. В 1648 г. зять Паскаля Флорен Перье по его просьбе провел серию экспе-

риментов на потухшем вулкане Пюи-де-Дом (фр. Puy-de-Dôme), показавших, что при относительной высоте горы 485 м столбик ртути на ее вершине (1464 м над уровнем моря) оказался примерно на  $3\frac{1}{2}$  дюйма ( $\approx 89$  мм рт. ст.) ниже, чем у *подножья* [13].

Плотность ртути зависит от температуры:

$$\rho_{\text{рт}} = 13595 \text{ кг/м}^3 - \text{при } 0 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{при } h = 0 \text{ м} - t = 15 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{при } h = 400 \text{ м} - t = 12,4 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{при } h = 1000 \text{ м} - t = 8,501 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\text{при } h = 1500 \text{ м} - t = 5,252 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$p_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па или } 760 \text{ мм рт. ст.},$$

$$p_{\text{атм}} = 96611,4 \text{ Па или } 725 \text{ мм рт. ст.},$$

$$p_{\text{атм}} = 89876,3 \text{ Па или } 674 \text{ мм рт. ст.},$$

$$p_{\text{атм}} = 84559,7 \text{ Па или } 634 \text{ мм рт. ст.},$$

$$g = 9,8066 \text{ м/с}^2;$$

$$g = 9,8054 \text{ м/с}^2;$$

$$g = 9,8036 \text{ м/с}^2;$$

$$g = 9,802 \text{ м/с}^2.$$

Для Международной стандартной атмосферы (сокр. МСА, англ. ISA) давление воздуха на среднем уровне моря при температуре  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  считается равным 101330 Па или 760 мм рт. ст., хотя [12]:

$$p_{\text{атм}} = \rho_{\text{рт}}gh = 13558 \cdot 9,8066 \cdot 0,76 = 101048 \text{ Па}.$$

Более вероятно, что Паскаль сравнивал давление на вершине горы и в *городе* Клермон-Ферран (410 м над уровнем моря). Впоследствии единицу измерения давления назвали его именем.

Начало развитию компрессорной техники положил немецкий физик Отто фон Герике (нем. Otto von Guericke, 1602–1686), с 1646 г. – бургомистр города Магдебург, который в 1650 г. изобрел поршневой воздушный насос, позволявший получить давление *ниже атмосферного*. Не зная об опытах Торричелли и пытаясь опровергнуть представление перипатетиков о пустоте [12], в 1654 г. в Регенсбурге и в 1658 г. в Магдебурге он провел публичный эксперимент, подтвердивший наличие атмосферного давления: совместил два металлических полушария диаметром около 60 см, уложив между ними кожаное кольцо, пропитанное расплавленным воском для герметизации, и откачал с помощью своего нового изобретения воздух из внутренней полости. Атмосферное давление прижало полушария друг к другу с такой силой, что восемь пар лошадей не смогли разъединить их, пока не открыли клапан для доступа наружного воздуха. Впоследствии опыт получил название «Магдебургские полушария» [14]. Отто фон Герике повторил эксперимент в 1663 г. в Берлине с 12 парами лошадей [11].

Значительные усовершенствования в пневматический насос Отто фон Герике внес Роберт Бойль (англ. Robert Boyle, 25.01.1627–31.12.1691), экспериментально установивший в 1662 г. за-

$$\rho_{\text{рт}} = 13583 \text{ кг/м}^3 - \text{при } 5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\rho_{\text{рт}} = 13570 \text{ кг/м}^3 - \text{при } 10 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\rho_{\text{рт}} = 13558 \text{ кг/м}^3 - \text{при } 15 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\rho_{\text{рт}} = 13546 \text{ кг/м}^3 - \text{при } 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Согласно ГОСТ 4401–81, температура  $t$ , атмосферное давление  $p_{\text{атм}}$  и ускорение свободного падения  $g$  зависят от высоты следующим образом:

кон поведения идеального газа в изотермическом процессе, который в 1676 г. независимо повторил французский физик Эдм Мариотт (фр. Edme Mariotte, 1620–12.05.1684). В 1787 г. французский ученый Жак Александр Сезар Шарль (фр. Jacques Alexandre César Charles, 12.11.1746–7.04.1823) установил зависимость давления идеального газа от температуры при изохорном процессе, а в 1802 г. французский химик Жозеф Луи Гей-Люссак (фр. Joseph-Louis Gay-Lussac, 6.12.1778–9.05.1850) опубликовал закон пропорциональной зависимости объема идеального газа от абсолютной температуры при изобарном процессе. Дополнив законы Бойля–Мариотта, Шарля и Гей-Люссака законом Авогадро, французский физик Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (фр. Benoît Paul Émile Clapeyron, 26.01.1799–28.01.1864), получил в 1834 г. уравнение состояния идеального газа, а его современный вид с универсальной газовой постоянной предложил в 1874 г. основатель периодической системы химических элементов Д. И. Менделеев (27.01.1834–20.01.1907).

Совершенствованию компрессоров в XVIII–XIX веках способствовала промышленная революция. Значительным шагом в истории развития поршневых компрессоров стало создание русским изобретателем И. И. Ползуновым (14.03.1728–27.05.1766) в 1765 году машины для сжатия и перемещения газа – пока еще одноступенчатой, но уже промышленной.

Британский инженер Джордж Медхерст (англ. George Medhurst, 1759–1827) в 1799 г. запатентовал ветряной насос для сжатия воздуха с целью получения движущей силы. Позже он опубликовал описание пневматической почты и атмосферной железной дороги [15], а также спроектировал первый кессон для подводных работ.

В 1878 г. немецкий инженер Генрих Кригар (нем. Heinrich Krigar) из Ганновера запатентовал конструкцию винтовых компрессоров, но лишь в 1935 г. шведский инженер Альф Лисхольм (швед. AlfJames Rudolf Lysholm, 14.12.1893–20.02.1973) смог реализовать технологию их изготовления, которая легла в основу турбонагнетателей воздуха во впускной коллектор двигателя.

К преимуществам сжатого воздуха как рабочего тела можно отнести [16]:

- 1) доступность;
- 2) легкость транспортировки по трубопроводам на значительные расстояния;
- 3) способность аккумулировать энергию в закрытых баллонах;

- 4) относительная стабильность при температурных изменениях;
- 5) экологическая чистота;
- 6) устойчивость к перегрузкам, радиации и магнитным полям.

Недостатками, ограничивающими использование пневматики, являются [17]:

- 1) сложность подготовки воздуха;
- 2) большие затраты энергии на сжатие;
- 3) сжимаемость, усложняющая стабильное перемещение груза, точную регулировку и остановку.

Достоинства и недостатки сжатого воздуха обусловили эффективное использование пневматики в различных сферах жизнедеятельности человека (рис. 1).

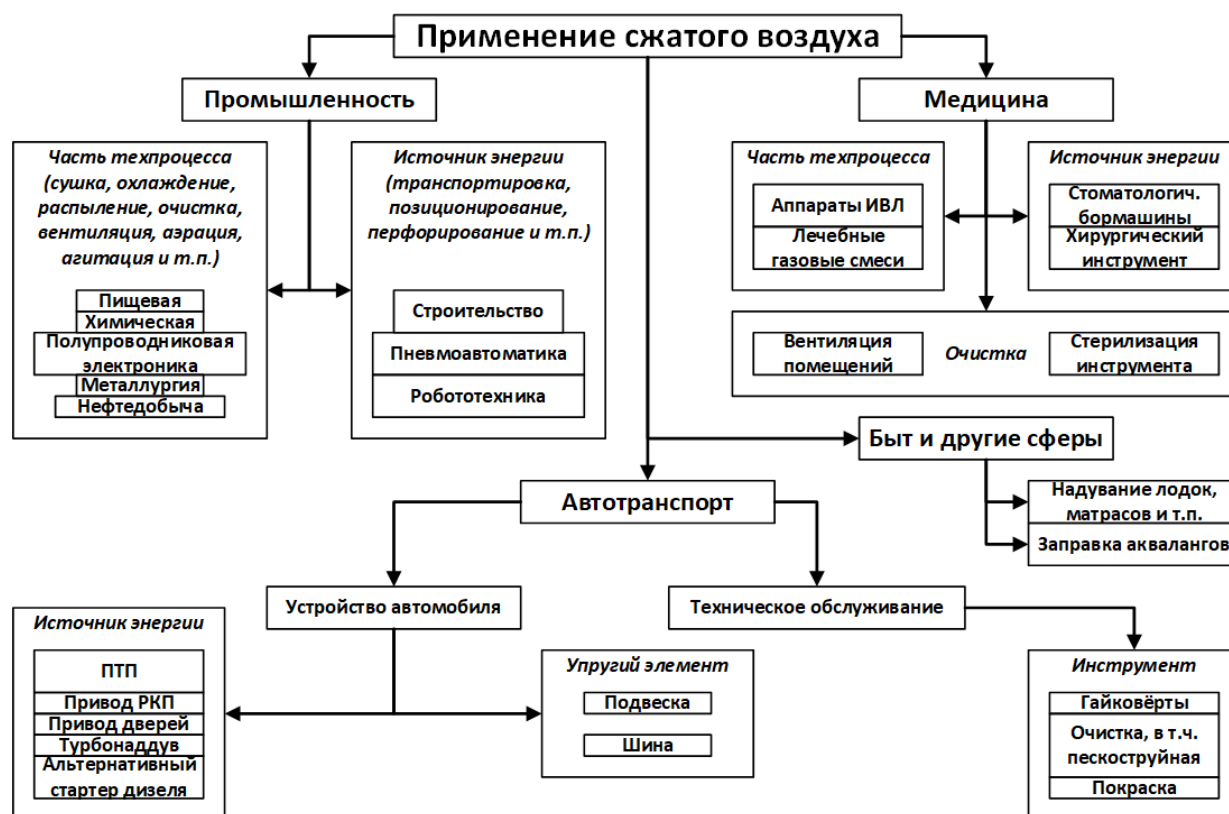


Рис. 1. Некоторые сферы применения сжатого воздуха

Массовое применение сжатого воздуха началось в конце XIX века и распространилось на многие отрасли. В быту оно связано в основном с использованием компрессоров, позволяющих осуществить широкий спектр работ. В промышленности, медицине сжатый воздух используется преимущественно двумя способами. Во-первых, он участвует в различных технологических процессах. В этом случае предъявляются повышенные требования к его качеству

(очистка, удаление конденсата). Во-вторых, он служит в качестве *энергоносителя* (источника энергии) для выполнения механической работы, то есть для питания всевозможных пневматических приводов, например, в строительстве – отбойный молоток, в медицине – стоматологические бормашины, на железнодорожных составах и в грузовых автомобилях – пневматический тормозной привод (ПТП) [18]. Системы позиционирования с множеством промежуточ-

ных положений широко применяются в тех случаях, когда не требуются большие нагрузки и высокая точность, что делает пневматику неотъемлемой частью автоматизации производственных процессов.

В 1641 году Торричелли сформулировал закон истечения жидкости из малого отверстия в стенке открытого сосуда в зависимости от высоты жидкости над отверстием (формула Торричелли), на основе которого спустя сто лет (в 1738–43 гг.) Иоганн Бернулли (нем. Johann Bernoulli, 27.07.1667–01.01.1748) и его сын Даниил Бернулли (Daniel Bernoulli, 29.01.1700–17.03.1782) разработали свое знаменитое уравнение, устанавливающее зависимость между скоростью стационарного потока несжимаемой жидкости и ее давлением [19], которое применимо к идеальному газу в случае, если он не совершает никакой работы [20]. Однако уравнение Бернулли несправедливо для реальных газов, так как в нем не учтены сжимаемость и вязкость.

Уравнение Менделеева–Клапейрона успешно используют при моделировании контакта шины с дорогой [21] и процесса регулирования давления воздуха в них [22; 23], а также при расчете статической характеристики пневматического упругого элемента подвески [24]. Однако для расчета быстродействия пневмати-

ческой активной подвески [25], электропневматического тормозного привода (ЭТП) [26] или пневматической антиблокировочной системы (АБС) [27] требуются более сложные зависимости. Так, на сегодняшний день в открытом доступе отсутствуют работы по расчету быстродействия электропневматического привода роботизированной коробки передач с двойным сцеплением.

В 1970-х гг. при использовании приводов высокого давления в пневмоавтоматике проявилась тенденция рассматривать рабочее тело не как идеальный газ, подчиняющийся уравнению Клапейрона [28], а как реальный газ [29], «состояние которого описывается в зависимости от конкретных условий» [30] одним из многочисленных уравнений – Ван-дер-Ваальса [31; 32], Дюпре [33; 34] и другими [35–38]. В работах Е. В. Герц «описываются газодинамические процессы, происходящие в пневматических приводах, отражающие теплообмен с окружающей средой, утечки воздуха и силы трения» [39]. Используется «подход к математическому моделированию термодинамических процессов с учетом параметров реальных газов, при котором традиционные уравнения состояния заменяются значениями, полученными интерполяцией *экспериментальных* данных» [40].

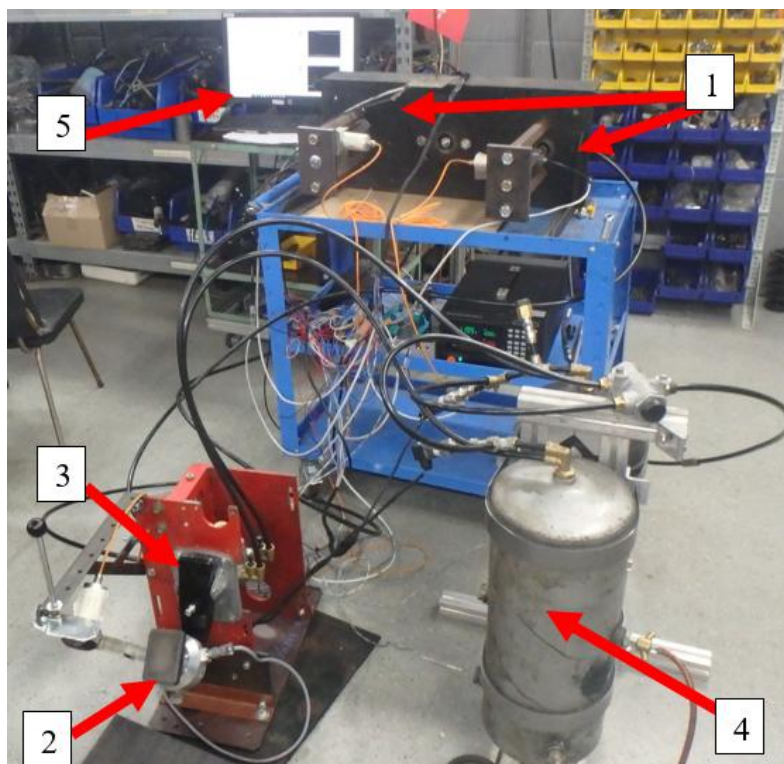


Рис. 2. Общий вид стеновой установки для исследования характеристик двухконтурного ПТП: 1 – тормозные камеры; 2 – педаль тормоза; 3 – тормозной кран; 4 – ресиверы; 5 – регистрирующая аппаратура

В 2003–2006 гг. опыт КБ «Мотор» по расчету времени срабатывания ПТП на основе диаграммы функций давления, разработанной Е. В. Герц, применялся в дипломном проектировании на кафедре тягачей и амфибийных машин МАДИ. В 2016 году были инициированы исследования по уточнению методики [41; 42], которые требовали эмпирической проверки.

В 2025 году в лаборатории тормозных систем ИЦПА ФГУП «НАМИ» по заказу Центра «Специальные транспортные средства» был разработан и изготовлен стенд для исследования характеристик двухконтурного ПТП (рис. 2). В ходе исследований решались следующие задачи:

1) подтвердить зависимость времени срабатывания от объема контура, то есть длины трубопровода и типоразмера тормозной камеры (рис. 3);

2) проверить статические характеристики тормозных камер, то есть зависимость усилия на штоке от их типоразмера и давления в контуре (рис. 4);

3) получить индикаторную характеристику портативного компрессора (рис. 5), который использовался для подкачки ресиверов;

4) изучить температурные явления в ресиверах при активизации тормозной системы (рис. 6);

5) установить зависимость усилия на педали тормоза от манеры нажатия (рис. 7) и посадки водителя (рис. 8).

Для решения поставленных задач стенд включал следующее сенсорное обеспечение:

1) датчики давления в ресиверах, на выходе из обеих секций тормозного крана и на входе в тормозные камеры;

2) датчики перемещения на педали и штоках тормозных камер;

3) датчики усилия на педали и штоках тормозных камер;

4) датчики температуры в ресиверах;

5) регистрирующую аппаратуру.

Контур ПТП состояли из трубопроводов, длина  $L$  которых варьировалась (2400, 4800, 12800 и 20150 мм) попеременно с тормозными камерами типа 20" и 30". Питание контуров производилось от двух ресиверов объемом  $V = 20$  л, заряжаемых от внешнего промышленного компрессора с давлением около 0,55...0,65 МПа через кран и защитный клапан. Кран служил для имитации двух состояний компрессора: рабочего ( $p = \text{const}$ ) и его отказа ( $p = \text{var}$ ). Соответственно, были проведены испытания на выносливость водителя (многократное нажатие при  $p = \text{const}$ ) и на истощение ресиверов (многократное нажатие при  $p = \text{var}$  до  $p = 0$ ).

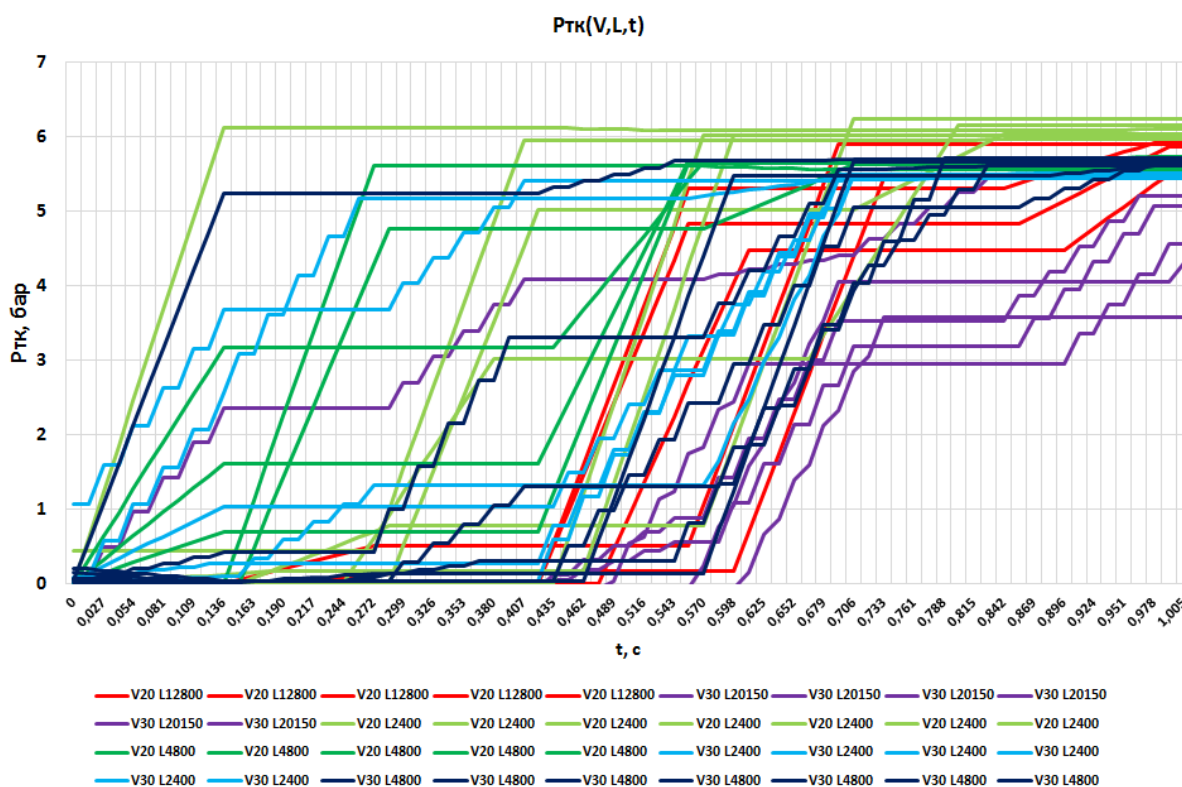


Рис. 3. Зависимость быстродействия от объема тормозного контура

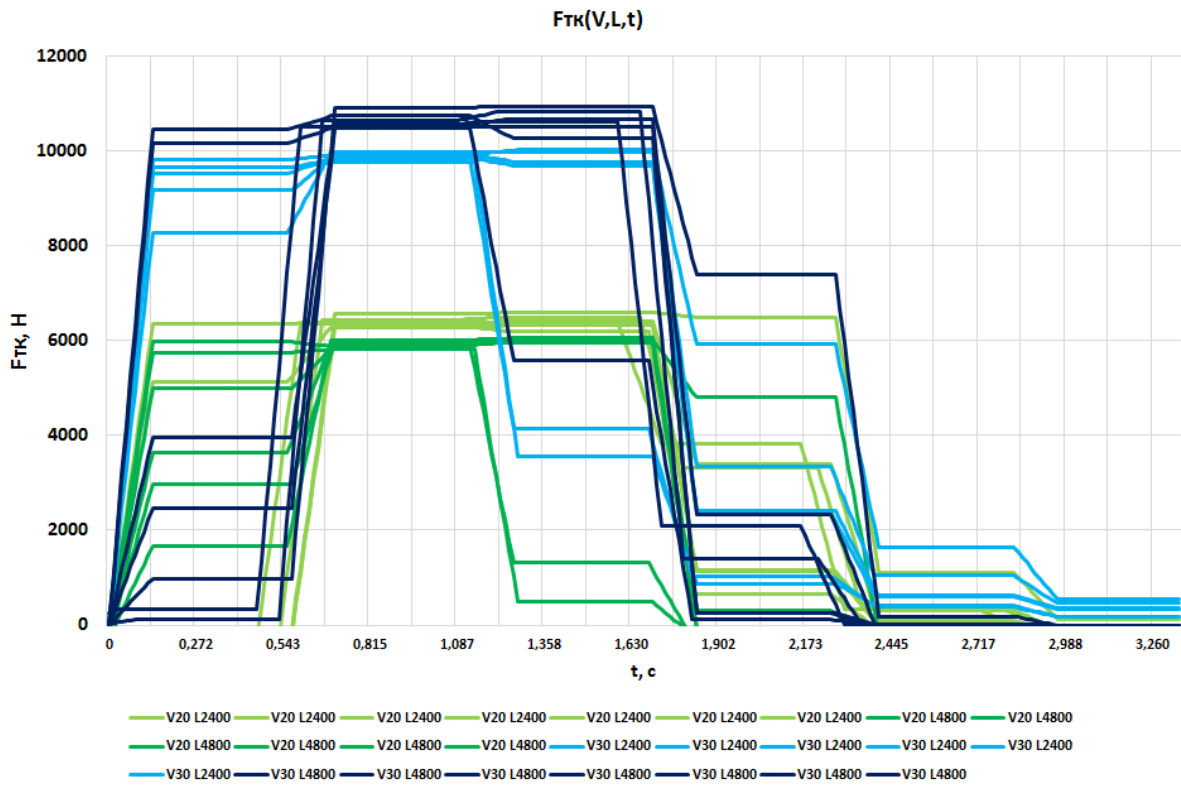


Рис. 4. Зависимость усилия на штоке тормозной камеры от ее типоразмера

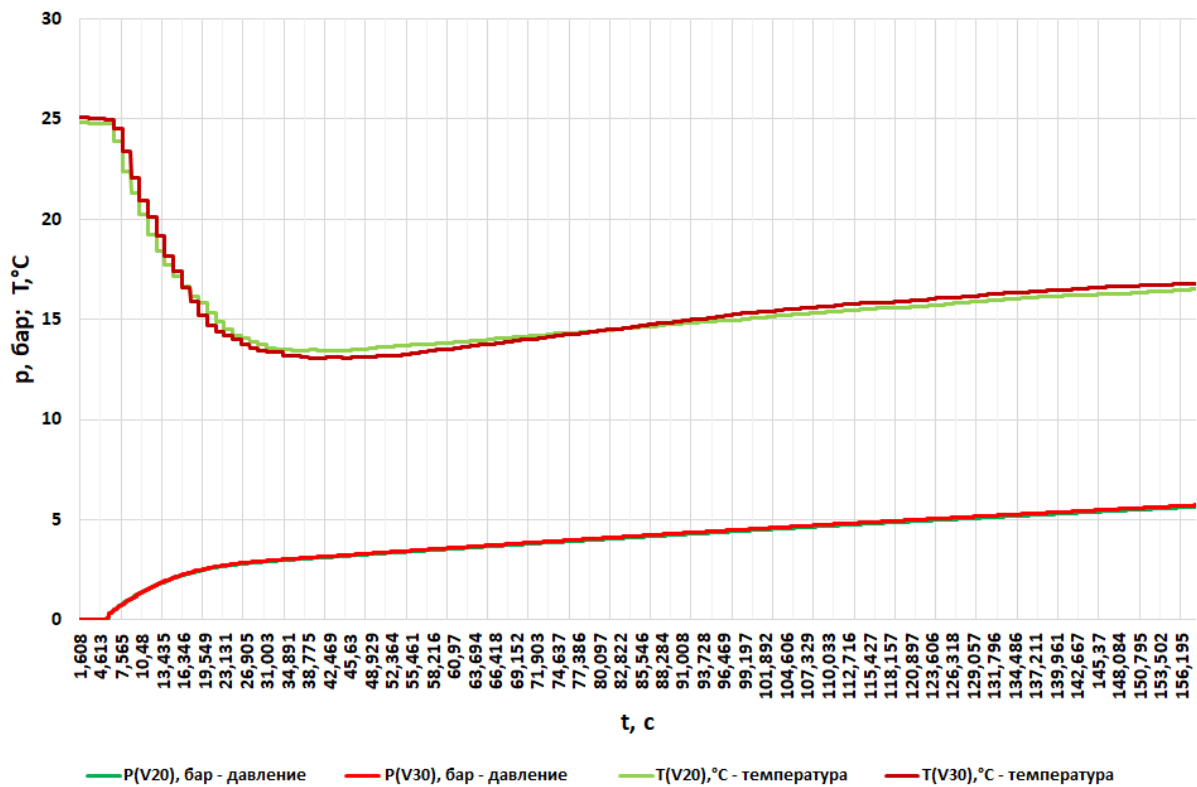


Рис. 5. Получение индикаторной характеристики портативного компрессора

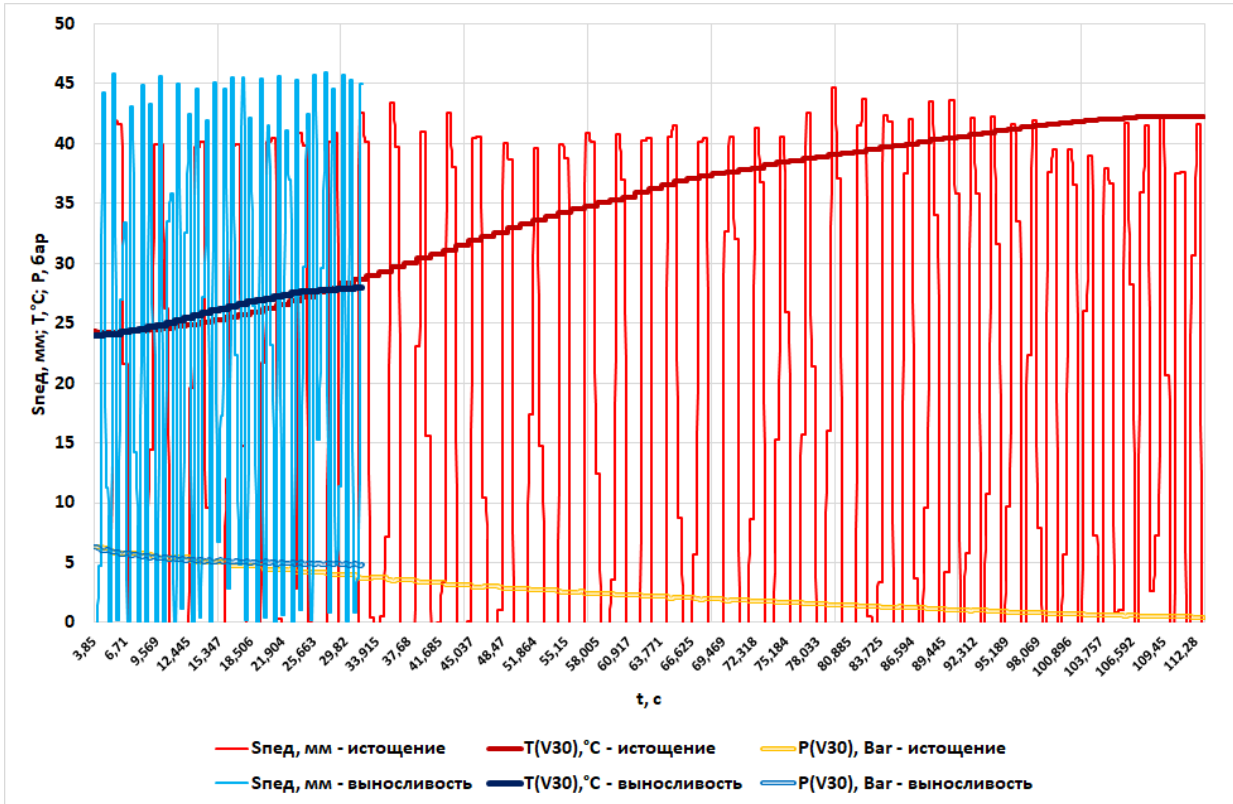


Рис. 6. Изменение температуры при многократной активизации (истощение  $p = var$  и выносливость  $p = const$ )

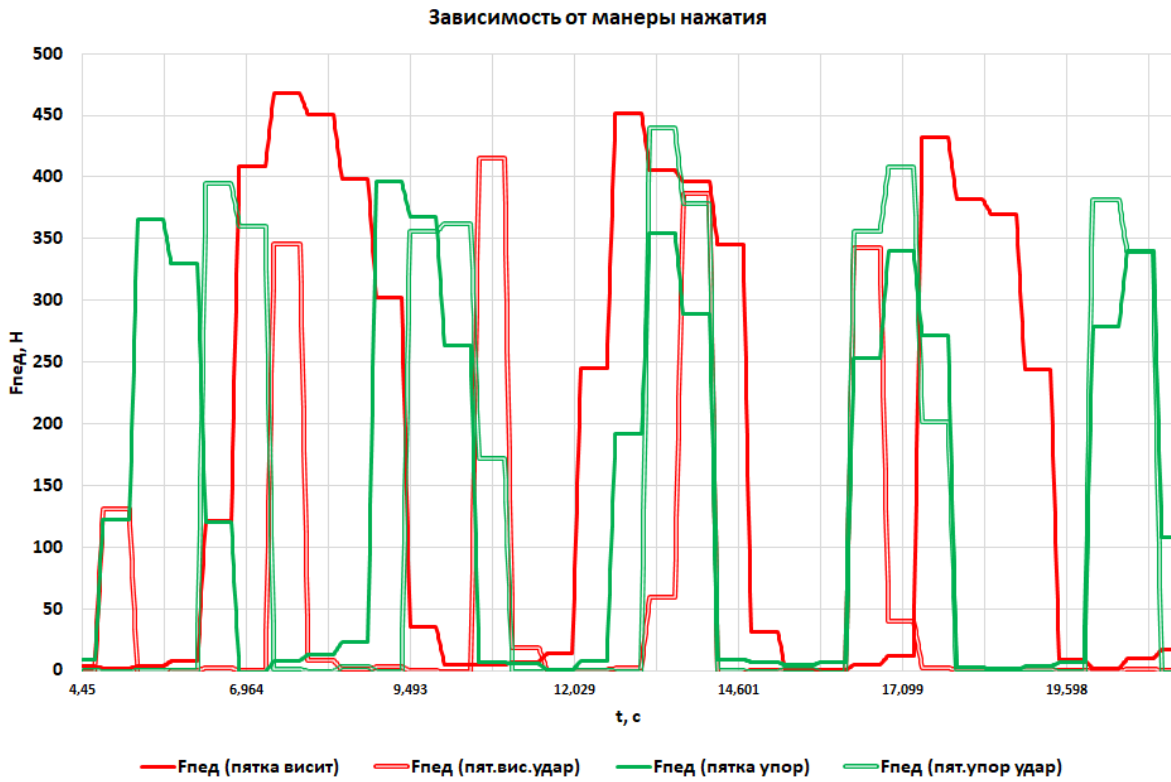


Рис. 7. Зависимость усилия на педали от манеры нажатия

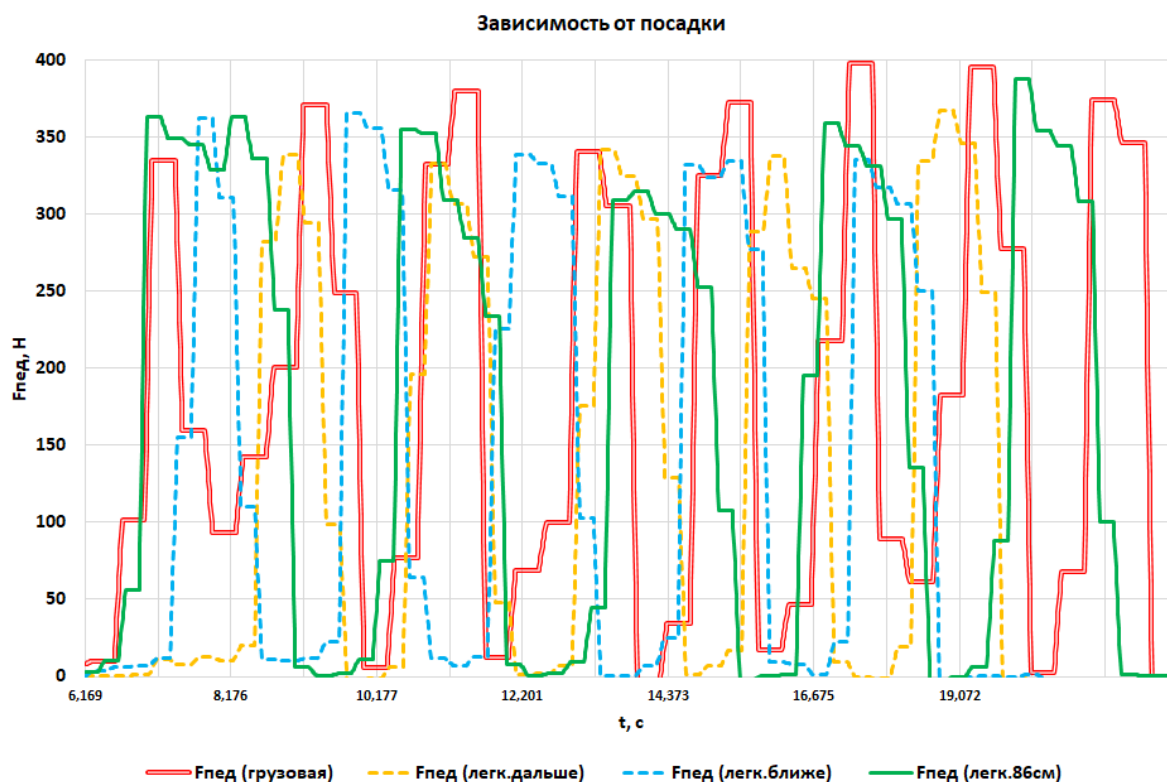


Рис. 8. Зависимость усилия на педали от посадки водителя

Манера нажатия различалась положением пятки (висит или упирается в пол) и исходным положением мыска (на педали или на некотором расстоянии от нее, то есть осуществлялся удар) в соответствии с биомеханикой водителя [43]. Посадка водителя различалась по высоте сидения (легковая или грузовая [44]) и по его продольному расположению (оптимальное с точки зрения угла сгиба в колене, что для испытуемого составило 86 см, а также ближе и дальше оптимального).

Анализ результатов исследований позволил сделать ряд важных выводов:

1. Время быстрого действия ожидаемо возрастает с увеличением объема тормозного контура.
2. Как следует из рис. 4, усилие на штоке тормозной камеры пропорционально рабочей площади ее диафрагмы ( $S_{20} = 12903 \text{ мм}^2$ ,  $S_{20} = 19355 \text{ мм}^2$ ).
3. Температура в ресиверах при их истощении возрастает более чем на  $15^\circ\text{C}$ .
4. Усилие при грузовой посадке больше, чем при легковой, так как к усилию мышцы добавляется вес ноги. При этом целесообразно исследовать влияние вторичного поддрессирования [45], которое может приводить к снижению усилия на педали в случае синфазных колебаний сидения и ноги водителя.

5. При оптимальной легковой посадке усилие на педали, как правило, оказывалось выше, чем при другом продольном расположении сидения, но незначительно и нестабильно.

6. Когда пятка упирается в пол, усилие при ударе оказалось больше, чем при совместном ускорении мыска и педали, так как ступня в исходном состоянии отгибается назад в неестественное положение, и рабочий ход педали совпадает с максимальным усилием мышцы. Когда пятка висит, усилие при ударе оказалось меньше, так как работает голень или бедро, и рабочий ход педали совпадает с участком, где усилие мышцы снижается [46].

Выбранная изначально регистрирующая аппаратура с фактической частотой измерений около 6 Гц позволила получить некоторые статистические характеристики ПТП. Для исследования его динамических свойств с целью подтверждения разработанной математической модели [41] в настоящее время готовятся дальнейшие испытания с частотой измерений 300 Гц.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Власюк, Т. А. Исторический анализ создания и развития насосостроения / Т. А. Власюк, А. З. Скороход // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2020. – № 1(40). – С. 88–95. – EDNUYERAX.

2. Щаблов, Н. Н. Зарождение пожарной охраны / Н. Н. Щаблов, В. Н. Виноградов // Психолого-педагогические проблемы безопасности человека и общества. – 2012. – № 3(16). – С. 69–78. – EDNWVSFDQ.
3. Виноградов, В. Н. Пожарно-спасательная техника в исторической ретроспективе. Первые создатели пожарного насоса / В. Н. Виноградов, А. А. Луговой // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2022. – № 1(41). – С. 56–62. – EDNJTVRUW.
4. Игошина, Д. А. Анализ существующих насосных установок для подачи жидкости / Д. А. Игошина, Д. Н. Игошин, Н. А. Смирнов // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 6(37). – С. 59–66. – EDNSUDQEX.
5. Краткий исторический очерк о противопожарном водоснабжении / В. А. Абрамов, И. С. Владимирова, А. А. Пименов, В. Ф. Сметанин // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 1(41). – С. 17. – EDNRCXZWX.
6. Метод расчета коэффициентов напорно-расходных характеристик пожарного насоса / И. А. Ольховский, А. Н. Лебедев, В. А. Меженев, В. Я. Гладченко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 1. – С. 48–57. – DOI 10.25257/FE.2021.1.48-57. – EDNHZSSNB.
7. Шейпак, А. А. История создания насосов и механика жидкости (посвящается столетию кафедры Э10 МГТУ имени Н. Э. Баумана) / А. А. Шейпак // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2015. – № 5. – С. 397–414. – DOI 10.7463/0515.0776292. – EDNUBXQYZ.
8. Яковлев, В. И. Из истории индустриальной механики / В. И. Яковлев // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2018. – № 4(43). – С. 87–92. – DOI 10.17072/1993-0550-2018-4-87-92. – EDNYRJEEX.
9. Смык, А. Ф. Историко-индуктивный и логико-дедуктивный методы в курсе физики / А. Ф. Смык // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2017. – № 4(14). – С. 9. – EDNVTTXFB.
10. Прончатов, В. Н. Способ преобразования энергии как системообразующий фактор общественных отношений / В. Н. Прончатов // Философия хозяйства. – 2012. – № 3(81). – С. 170–179. – EDNRRUNQL.
11. Техническая термодинамика. Историческое становление: учебное пособие / Д. М. Кучинский, Н. П. Малых, Д. О. Глазырина, Е. Н. Алексин. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2025. – 135 с. – ISBN 978-5-88303-723-7. – EDNOQSJNR.
12. Должикова, Н. Н. История использования вакуума на службе человеку / Н. Н. Должикова, И. В. Назаров // Активная честолюбивая интеллектуальная молодежь сельскому хозяйству. – 2021. – № 2(11). – С. 14–25. – EDNVHNWCH.
13. Погорельская, Е. Ю. Освоение пространства в технических решениях нового времени / Е. Ю. Погорельская // Вестник Омского университета. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 37–48. – DOI 10.24147/1812-3996.2025.3.37-48. – EDNZUSQKR.
14. Майер, В. В. Ученический проект для будущих учителей: школьные опыты с воздушным насосом / В. В. Майер, Е. И. Вараксина // Учебная физика. – 2018. – № 2. – С. 3–11. – EDNSAPXVD.
15. Гуськов, А. Н. Перспективы трубопроводного транспорта / А. Н. Гуськов // Мир транспорта. – 2010. – Т. 8, № 1(29). – С. 104–109. – EDN LMCKTP.
16. Малиновский, М. П. Сравнительный анализ тормозных систем / М. П. Малиновский, А. К. Чикина // Автомобильная промышленность. – 2025. – № 1. – С. 16–21. – EDN GEHNAE.
17. Malinovsky, M. P. Comparison of brake drives with different energy carriers in terms of mass, cost and gain factor / M. P. Malinovsky, A. K. Chikina // Science Journal of Transportation. – 2024. – No. 2(18). – P. 57-68. – EDN IQYTAS.
18. Малиновский, М. П. Интегральный тормозной кран как средство уменьшения остановочного пути при отказе рабочих контуров / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 4(53). – С. 54–67. – DOI 10.35211/2500-0586-2025-4-53-54-67. – EDNOONZZE.
19. Коньков, А. Ю. Способ измерения цикловой подачи топлива в цилиндрах тепловозного дизеля в условиях эксплуатационных испытаний / А. Ю. Коньков, В. А. Лашко, М. В. Яранцев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – № 1(24). – С. 119–124. – EDN OWUAPN.
20. Бубнов, В. А. Об уточнении уравнения Д. Бернулли в гидродинамике / В. А. Бубнов // Вестник МГПУ. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 1(17). – С. 9–24. – EDN TOLESD.
21. Абдулгизис, А. У. Моделирование контакта пневматической шины с дорогой / А. У. Абдулгизис, С. А. Феватов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2012. – № 36. – С. 9–16. – EDNUXNEJP.
22. Богданов, А. В. Обоснование параметров устройства для поддержания заданного давления воздуха в шинах колесных машин / А. В. Богданов, Ю. Б. Четыркин, Е. А. Лещенко // Аграрный вестник Урала. – 2012. – № 11-1(103). – С. 44–46. – EDN PWTBJD.
23. Абрамов, В. Н. Математическое моделирование изменения внутреннего давления воздуха в шине при ее механических повреждениях / В. Н. Абрамов, А. Г. Гербер, В. Б. Каспаров // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 4(51). – С. 32–40. – EDNVEATAP.
24. Малиновский, М. П. Расчет характеристики пневматического упругого элемента для превентивной системы динамической стабилизации автопоезда / М. П. Малиновский, В. В. Кувшинов, Е. С. Смолко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 4(63). – С. 43–54. – EDNYGPQAT.
25. Malinovsky, M. P. Experimental study of an articulated vehicle performing a lane changing maneuver / M. P. Malinovsky // Science Journal of Transportation. – 2022. – No. S(12). – P. 188-197. – EDNHCRNXG.
26. Малиновский, М. П. Оценка эффективности электропневматического тормозного привода автопоезда с применением итерационного метода / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 7. – С. 27–32. – EDNGYFGSC.
27. Малиновский, М. П. Динамический расчет контура пневматической антиблокировочной системы / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 2(81). – С. 20–33. – EDNSZCFZG.
28. Тарасов, В. В. Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе / В. В. Тарасов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 84–95. – DOI 10.21684/2411-7978-2016-2-2-84-95. – EDN XAYNQX.

29. Шкрет, Л. Я. Оценка количества природного газа в баллонах транспортных средств / Л. Я. Шкрет, А. М. Бочаров, Е. Л. Спиридонова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2004. – № 3. – С. 132а–133. – EDN NEDTRN.
30. Герц, Е. В. Расчет пневмоприводов: справочное пособие / Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
31. Гулина, С. А. Упрощение термодинамических расчетов тепловых машин путем использования модели идеальных газов / С. А. Гулина, М. Ю. Орлов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева. – 2009. – № 3–3(19). – С. 28–33. – EDN LLWRKD.
32. Галюжин, А. С. Определение объема конденсата при сжатии воздуха с использованием уравнений Клапейрона и Ван-дер-Ваальса / А. С. Галюжин, С. Д. Галюжин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2018. – № 4(61). – С. 110–119. – DOI 10.53078/20778481\_2018\_4\_110. – EDN YPLUWL.
33. Маршавин, А. Н. Уточнение и анализ математической модели истечения газа через суживающееся сопло / А. Н. Маршавин, Е. Б. Чудакова, Ю. С. Швыкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 12–1. – С. 64–73. – EDN XHPZCH.
34. Чернышев, А. В. Рекомендации по моделированию процессов истечения в пневматических системах с учетом свойств реального газа на основе безразмерных критериев / А. В. Чернышев, Н. В. Атамасов // Компрессорная техника и пневматика. – 2017. – № 3. – С. 19–23. – EDN YMYMUZ.
35. Кочетков, А. В. Механизмы адиабатического нагрева и охлаждения газов (тепловые процессы в двигателях внутреннего сгорания) / А. В. Кочетков, П. В. Федотов // Грузовик. – 2019. – № 4. – С. 29–37. – EDN XCHNNT.
36. Петрик, Г. Г. Общее кубическое уравнение состояния – какое? / Г. Г. Петрик // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 1(43). – С. 54–70. – DOI 10.25714/MNT.2020.43.008. – EDN ARLPXV.
37. Кучинский, Д. М. Изменение коэффициентов пропорциональности в уравнении новой модели реального газа / Д. М. Кучинский, Д. О. Глазырина, А. А. Михеева // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021. – № S1. – С. 355–357. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-355-357. – EDN OYGEFK.
38. Тенев, В. А. Моделирование газодинамических процессов с различными уравнениями состояния / В. А. Тенев, М. Р. Королева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 115–123. – DOI 10.22213/2410-9304-2023-3-115-123. – EDN PBSZPK.
39. Карьялайнен, А. Э. Сложности динамического расчета пневматической антиблокировочной тормозной системы / А. Э. Карьялайнен, А. М. Шайхуллин // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 2(39). – С. 41–44. – EDN WDNNGU.
40. Туголуков, Е. Н. Методика математического моделирования термодинамических процессов поршневого компрессора / Е. Н. Туголуков, Е. С. Егоров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – № 1. – С. 45–53. – EDN RUDUDV.
41. Малиновский, М. П. Расчет быстродействия пневматического тормозного привода на колесных транспортных средствах специального назначения / М. П. Малиновский, В. Д. Ролдугин, Н. А. Кулешова // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 4(47). – С. 68–74. – EDN XDBUJD.
42. Малиновский, М. П. Задачи, решаемые по диаграмме функций давления применительно к пневматическому тормозному приводу / М. П. Малиновский, Д. В. Лукьянов, А. А. Петров // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2017. – № 2(12). – С. 6. – EDN YTXHDR.
43. Иванов, В. И. Кинематика педалей и биомеханика водителя автомобиля / В. И. Иванов, О. И. Дроздова // Грузовик. – 2016. – № 12. – С. 11–14. – EDN XIPFUN.
44. Оптимизация параметров рабочего места водителя транспортного средства / Т. В. Кипень, В. С. Короткий, С. И. Кочетов, С. В. Харитончик // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2(15). – С. 39–42. – EDN QZPTOZ.
45. Марти, А. Н. К вопросу о динамической стабилизации водительского сиденья / А. Н. Марти, С. А. Марти // Грузовик. – 2016. – № 5. – С. 19–29. – EDN WFRXST.
46. Малиновский, М. П. Дефицит информации об управляющем воздействии на педали при моделировании систем управления транспортных средств / М. П. Малиновский, А. Ю. Домогаров, А. Н. Альбицкий // Автомобильная промышленность. – 2023. – № 12. – С. 8–14. – EDN DZEOCW.

## REFERENCES

1. Vlasyuk, T. A. Historical analysis of the creation and development of pump engineering / T. A. Vlasyuk, A. Z. Skorokhod // Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport. – 2020. – No. 1 (40). – Pp. 88-95. – EDN UYERAX.
2. Shchablov, N. N. The emergence of the fire service / N. N. Shchablov, V. N. Vinogradov // Psychological and pedagogical problems of human and society safety. – 2012. – No. 3 (16). – Pp. 69-78. – EDN WVSFDQ.
3. Vinogradov, V. N. Fire and rescue equipment in historical retrospect. The First Creators of the Fire Pump / V. N. Vinogradov, A. A. Lugovoy // Natural and Man-Made Risks (Physical, Mathematical and Applied Aspects). – 2022. – No. 1 (41). – Pp. 56-62. – EDN JTVRUW.
4. Igoshina, D. A. Analysis of Existing Pumping Units for Liquid Supply / D. A. Igoshina, D. N. Igoshin, N. A. Smirnov // Bulletin of NGIEI. – 2014. – No. 6 (37). – Pp. 59-66. – EDN SUDQEX.
5. Brief Historical Essay on Fire-Fighting Water Supply / V. A. Abramov, I. S. Vladimirova, A. A. Pimenov, V. F. Smetanin // Technologies of Technosphere Safety. – 2012. – No. 1(41). – P. 17. – EDN RCXZVZ.
6. Method for calculating the coefficients of pressure-flow characteristics of a fire pump / I. A. Olkhovsky, A. N. Lebedev, V. A. Mezhenov, V. Ya. Gladchenko // Fires and emergencies: prevention, liquidation. – 2021. – No. 1. – P. 48-57. – DOI 10.25257/FE.2021.1.48-57. – EDN HZSSNB.
7. Sheipak, A. A. History of the creation of pumps and fluid mechanics (dedicated to the centenary of Department E10 of Bauman Moscow State Technical University) / A. A. Sheipak // Science and education: scientific publication of Bauman Moscow State Technical University. – 2015. – No. 5. – P. 397-414. – DOI 10.7463/0515.0776292. – EDN UBXYQZ.
8. Yakovlev, V. I. From the history of industrial mechanics / V. I. Yakovlev // Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. – 2018. – No. 4(43). – P. 87-92. – DOI 10.17072/1993-0550-2018-4-87-92. – EDN YRJEEX.
9. Smyk, A. F. Historical-inductive and logical-deductive methods in the course of physics / A. F. Smyk // Automobile.

Road. Infrastructure. – 2017. – No. 4(14). – P. 9. – EDN VTTXFB.

10. *Pronchatov, V. N.* The method of energy conversion as a system-forming factor in social relations / V. N. Pronchatov // *Philosophy of Economy*. – 2012. – No. 3(81). – P. 170-179. – EDN RRUNQL.

11. *Technical Thermodynamics. Historical Development: A Textbook* / D. M. Kuchinsky, N. P. Malykh, D. O. Glazyrina, E. N. Aleksin. – St. Petersburg: St. Petersburg State Marine Technical University, 2025. – 135 p. – ISBN 978-5-88303-723-7. – EDN OQSJNR.

12. *Dolzhikova, N. N.* History of the Use of Vacuum in the Service of Man / N. N. Dolzhikova, I. V. Nazarov // *Active Ambitious Intellectual Youth in Agriculture*. – 2021. – No. 2(11). – Pp. 14-25. – EDN VHNWCH.

13. *Pogorelskaya, E. Yu.* Space exploration in modern engineering solutions / E. Yu. Pogorelskaya // *Bulletin of Omsk University*. – 2025. – Vol. 30, No. 3. – Pp. 37-48. – DOI 10.24147/1812-3996.2025.3.37-48. – EDN ZUSQKR.

14. *Mayer, V. V.* Student project for future teachers: school experiments with an air pump / V. V. Mayer, E. I. Varaksina // *Educational physics*. – 2018. – No. 2. – Pp. 3-11. – EDN SAPXVD.

15. *Guskov, A. N.* Prospects for pipeline transport / A. N. Guskov // *World of transport*. – 2010. – Vol. 8, No. 1(29). – Pp. 104-109. – EDN LMCKTP.

16. *Malinovsky, M. P.* Comparative analysis of braking systems / M. P. Malinovsky, A. K. Chikina // *Automotive industry*. – 2025. – No. 1. – Pp. 16-21. – EDN GEHNAE.

17. *Malinovsky, M. P.* Comparison of brake drives with different energy carriers in terms of mass, cost and gain factor / M. P. Malinovsky, A. K. Chikina // *Science Journal of Transportation*. – 2024. – No. 2(18). – Pp. 57-68. – EDN IQYTAS.

18. *Malinovsky, M. P.* Integral brake valve as a means of reducing the stopping distance in case of failure of the working circuits / M. P. Malinovsky, E. S. Smolko // *Energy and resource conservation: industry and transport*. – 2025. – No. 4(53). – Pp. 54-67. – DOI 10.35211/2500-0586-2025-4-53-54-67. – EDN OONZZE.

19. *Konkov, A. Yu.* Method for measuring the cyclic fuel supply in the cylinders of a locomotive diesel engine under operational test conditions / A. Yu. Konkov, V. A. Lashko, M. V. Yarantsev // *Bulletin of the Pacific State University*. – 2012. – No. 1(24). – Pp. 119-124. – EDN OWUAPN.

20. *Bubnov, V. A.* On the refinement of D. Bernoulli's equation in hydrodynamics / V. A. Bubnov // *Bulletin of Moscow State Pedagogical Univ. Series: Natural Sciences*. – 2015. – No. 1(17). – P. 9-24. – EDN TOLESD.

21. *Abdulgazis, A. U.* Modeling of Pneumatic Tire Contact with the Road / A. U. Abdulgazis, S. A. Fevatov // *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. – 2012. – No. 36. – Pp. 9-16. – EDN UXNEJP.

22. *Bogdanov, A. V.* Justification of the Parameters of a Device for Maintaining a Set Air Pressure in Tires of Wheeled Vehicles / A. V. Bogdanov, Yu. B. Chetyrkin, E. A. Leshchenko // *Agrarian Bulletin of the Urals*. – 2012. – No. 11-1(103). – Pp. 44-46. – EDN PWTBJD.

23. *Abramov, V. N.* Mathematical modeling of changes in internal air pressure in a tire during its mechanical damage / V. N. Abramov, A. G. Gerber, V. B. Kasparov // *The World of Transport and Technological Machines*. – 2015. – No. 4(51). – Pp. 32-40. – EDN VEATAP.

24. *Malinovsky, M. P.* Calculation of the characteristics of a pneumatic elastic element for a preventive dynamic stabilization system of a road train / M. P. Malinovsky, V. V. Kuv-

shinov, E. S. Smolko // *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. – 2020. – No. 4(63). – Pp. 43-54. – EDN YGPQAT.

25. *Malinovsky, M. P.* Experimental study of an articulated vehicle performing a lane changing maneuver / M. P. Malinovsky // *Science Journal of Transportation*. – 2022. – No. S(12). – P. 188-197. – EDN HCRNXG.

26. *Malinovsky, M. P.* Evaluation of the efficiency of the electropneumatic brake drive of a road train using an iterative method / M. P. Malinovsky, E. S. Smolko // *Automotive industry*. – 2020. – No. 7. – P. 27-32. – EDN GYFGSC.

27. *Malinovsky, M. P.* Dynamic calculation of the circuit of the pneumatic anti-lock braking system / M. P. Malinovsky, E. S. Smolko // *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. – 2025. – No. 2(81). – P. 20-33. – EDN SZCFZG.

28. *Tarasov, V. V.* Calculation of the outflow time of an ideal gas from a reservoir of constant volume into a medium with constant pressure during an adiabatic process / V. V. Tarasov // *Bulletin of Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*. – 2016. – Vol. 2, No. 2. – P. 84-95. – DOI 10.21684/2411-7978-2016-2-2-84-95. – EDN XAYNQX.

29. *Shkret, L. Ya.* Estimation of the amount of natural gas in vehicle cylinders / L. Ya. Shkret, A. M. Bocharov, E. L. Spiridonova // *News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*. – 2004. – No. 3. – Pp. 132a-133. – EDN NEDTRN.

30. *Gerts, E. V.* Calculation of pneumatic drives: a reference manual / E. V. Gerts, G. V. Kreinin. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 272 p.

31. *Gulina, S. A.* Simplification of thermodynamic calculations of heat engines by using the ideal gas model / S. A. Gulina, M. Yu. Orlov // *Bulletin of the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev*. – 2009. – No. 3-3(19). – P. 28-33. – EDN LLWRKD.

32. *Galyuzhin, A. S.* Determination of the condensate volume during air compression using the Clapeyron and van der Waals equations / A. S. Galyuzhin, S. D. Galyuzhin // *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. – 2018. – No. 4(61). – P. 110-119. – DOI 10.53078/20778481\_2018\_4\_110. – EDN YPLUWL.

33. *Marshavin, A. N.* Refinement and analysis of the mathematical model of gas outflow through a converging nozzle / A. N. Marshavin, E. B. Chudakova, Yu. S. Shvykin // *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. – 2016. – No. 12-1. – Pp. 64-73. – EDN XHPZCH.

34. *Chernyshev, A. V.* Recommendations for modeling outflow processes in pneumatic systems taking into account the properties of a real gas based on dimensionless criteria / A. V. Chernyshev, N. V. Atamasov // *Compressor technology and pneumatics*. – 2017. – No. 3. – P. 19-23. – EDN YMYMUZ.

35. *Kochetkov, A. V.* Mechanisms of adiabatic heating and cooling of gases (thermal processes in internal combustion engines) / A. V. Kochetkov, P. V. Fedotov // *Truck*. – 2019. – No. 4. – P. 29-37. – EDN XCHNNT.

36. *Petrik, G. G.* General cubic equation of state - which one? / G. G. Petrik // *Monitoring. Science and Technology*. – 2020. – No. 1(43). – P. 54-70. – DOI 10.25714/MNT.2020.43.008. – EDN ARLPXV.

37. *Kuchinsky, D. M.* Changing the proportionality coefficients in the equation of a new real gas model / D. M. Kuchinsky, D. O. Glazyrina, A. A. Mikheeva // *Proceedings of the Krylov State Research Center*. – 2021. – No. S1. – P. 355-357. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-355-357. – EDN OYGEFK.

38. *Tenenev, V. A.* Modeling of gas-dynamic processes with different equations of state / V. A. Tenenev, M. R. Koroleva // Intelligent systems in production. - 2023. - Vol. 21, No. 3. - P. 115-123. - DOI 10.22213/2410-9304-2023-3-115-123. - EDN PBSZPK.
39. *Karjalainen, A. E.* Difficulties of dynamic calculation of pneumatic anti-lock braking system / A. E. Karjalainen, A. M. Shaikhullin // Energy and resource saving: industry and transport. - 2022. - No. 2(39). - P. 41-44. - EDN WDNNUGU.
40. *Tugolukov, E. N.* Methodology of mathematical modeling of thermodynamic processes of a piston compressor / E. N. Tugolukov, E. S. Egorov // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Control, Computing and Informatics. - 2014. - No. 1. - P. 45-53. - EDN RUDUDV.
41. *Malinovsky, M. P.* Calculation of the response time of a pneumatic brake drive on special-purpose wheeled vehicles / M. P. Malinovsky, V. D. Roldugin, N. A. Kuleshova // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). - 2016. - No. 4 (47). - P. 68-74. - EDN XDBUJD.
42. *Malinovsky, M. P.* Problems solved using the pressure function diagram as applied to a pneumatic brake drive / M. P. Malinovsky, D. V. Lukyanov, A. A. Petrov // Automobile. Road. Infrastructure. - 2017. - No. 2 (12). - P. 6. - EDN YTXADR.
43. *Ivanov, V. I.* Kinematics of pedals and biomechanics of a car driver / V. I. Ivanov, O. I. Drozdova // Truck. - 2016. - No. 12. - Pp. 11-14. - EDN XIPFUN.
44. Optimization of the parameters of the driver's workplace of a vehicle / T. V. Kipen, V. S. Korotkiy, S. I. Kochetov, S. V. Kharitonchik // Mechanics of machines, mechanisms and materials. - 2011. - No. 2 (15). - Pp. 39-42. - EDN QZPTOZ.
45. *Marti, A. N.* On the issue of dynamic stabilization of the driver's seat / A. N. Marti, S. A. Marti // Truck. - 2016. - No. 5. - Pp. 19-29. - EDN WFRXST.
46. *Malinovsky, M. P.* Deficit of information about the control action on the pedals in modeling vehicle control systems / M. P. Malinovsky, A. Yu. Domogarov, A. N. Albitsky // Automotive industry. - 2023. - No. 12. - P. 8-14. - EDN DZEOCW.

Статья поступила в редакцию 11.02.2026, доработана 12.02.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 11.02.2026, revised 12.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 629.359  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-74-83

Научная статья  
Original article

*А. С. Дьяков, Д. С. Федоров*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ВСЕНАПРАВЛЕННЫМИ КОЛЕСАМИ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

✉ Дмитрий Сергеевич Федоров, dfedorov@bmstu.ru

**Аннотация.** Объектом исследования является транспортное средство с четырьмя всенаправленными колесами массой 118,7 кг, грузоподъемностью 100 кг. Целью исследования является оценка адекватности динамической модели транспортного средства с всенаправленными колесами.

Представлены методики проведенных натурных и виртуальных испытаний, способ статистической обработки результатов испытаний, результаты четырех типов испытаний: фронтального движения, бокового движения, диагонального движения, разворота на месте. Проведенные испытания отличаются тем, что фиксировались как кинематические, так и энергетические величины.

Представлена количественная статистическая оценка адекватности динамической модели транспортного средства с всенаправленными колесами по результатам натурных и виртуальных испытаний, основанная на современных статистических методах. Статистическая обработка данных выполнялась методами корреляционного и регрессионного анализа. Результаты показали высокую степень соответствия: коэффициент детерминации ( $R^2$ ) для кинематических параметров составил 0,999, для энергетических параметров — 0,928. Разработанная модель признана адекватной. Она может использоваться для прогнозирования кинематических параметров, динамических воздействий, энергозатрат, тракторной и курсовой устойчивости новых транспортных средств с всенаправленными колесами на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** мобильный робот, омни-колесо, Mecanum, всенаправленное движение, динамическая модель, верификация, адекватность, испытания, система управления, коэффициент детерминации

**Для цитирования:** Дьяков А. С., Федоров Д. С. Результаты теоретических и экспериментальных исследований движения транспортного средства с всенаправленными колесами. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 74–83. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-74-83.

### Информация об авторах:

**Алексей Сергеевич Дьяков** – д-р техн. наук, директор НОЦ «РОСТСЕЛЬМАШ-МГТУ», профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана

orcid: <https://orcid.org/0009-0005-7787-2354>

eLibrary SPIN: 9437-8400

e-mail: Diakov\_as@bmstu.ru

**Дмитрий Сергеевич Федоров** – инженер НОЦ «РОСТСЕЛЬМАШ-МГТУ» МГТУ им. Н. Э. Баумана

orcid: <https://orcid.org/0009-0006-6141-7864>

eLibrary SPIN: 9122-5314

e-mail: dfedorov@bmstu.ru

**Вклад авторов:**

**А. С. Дьяков** – определение цели работы, руководство ходом работы, участие в создании опытного образца, экспертная оценка, редактирование текста рукописи.

**Д. С. Федоров** – участие в создании опытного образца, проведение и анализ экспериментов, написание текста рукописи.

*A. S. Dyakov, D. S. Fedorov*

**THE RESULTS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES  
OF THE MOVEMENT OF A VEHICLE WITH MECANUM WHEELS**

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia**

✉ Dmitrii S. Fedorov, dfedorov@bmstu.ru

**Abstract.** The object under study is a mobile robot with four mecanum wheels. Its weight is 118,7 kg, its load capacity is 100 kg. The aim of the study is to evaluate the adequacy of its dynamic model.

The methods of experiments and virtual tests, the method of statistical processing of test results, and the results of four types of tests (frontal, lateral, diagonal, turning movement) are presented. The tests are distinguished by the fact that both kinematic and energy values were recorded.

A statistical assessment of the adequacy of the dynamic model of a vehicle with mecanum wheels is presented. The assessment is based on the results of experiments and virtual tests, as well as modern statistical methods. Statistical data processing was performed using correlation and regression analysis methods. The results showed a high degree of correspondence: the coefficient of determination (RI) for kinematic parameters was 0.999, and for energy parameters, it was 0.928. Thus, the developed model is recognized as adequate. It could be used to predict the kinematic characteristics, dynamic effects, energy consumption, trajectory and course stability of new vehicles with mecanum wheels during their design.

**Keywords:** mobile robot, omni-wheel, mecanum, omnidirectional motion, dynamic model, verification, adequacy, testing, control system, coefficient of determination

**For citation:** Dyakov A. S., Fedorov D. S. The results of theoretical and experimental studies of the movement of a vehicle with mecanum wheels. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 1(54): 74–83. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-74-83.

**Information about the authors:**

**Alexey S. Dyakov** – Dr. Sci. (Engineering), Prof. Bauman Moscow State Technical University

e-mail: Diakov\_as@bmstu.ru

**Dmitrii S. Fedorov** – Engineer Bauman Moscow State Technical University

e-mail: dfedorov@bmstu.ru

**Contribution of the authors:**

**Alexey S. Dyakov** – determined the purpose of the work, managed the progress of the work, participated in the creation of a prototype, provided expert assessment, edited the article.

**Dmitrii S. Fedorov** – participated in the creation of a prototype, conducted and analyzed the experiment, wrote the article.

**Введение**

Всенаправленные колеса отличаются тем, что обеспечивают не только управляемое фронтальное и поворотное движение транспортного средства, но также управляемое боковое и диагональное движение. Ограниченное применение транспортных средств (ТС) с всенаправленными колесами в первую очередь обусловлено недостаточным качеством существующих конструкций всенаправленных колес: сложностью изготовления, низкой плавностью хода, большой массой, сниженной надежностью, управляемостью, энергоэффективностью. Актуальной темой исследования является совершенствование всенаправленного колеса. Качество всенаправленного колеса количественно оценивается в том числе кинематическими, динамическими и энергетическими величинами, измеренными при движении ТС. Для оценки качества конструкции всенаправленного колеса

на этапе проектирования, и выбора оптимальной конструкции необходима динамическая модель, верифицированная по кинематическим и силовым или энергетическим параметрам.

В работах [1–12] представлены существующие сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований ТС с всенаправленными колесами, они проведены по кинематическим параметрам. Сравнения по силовым или энергетическим параметрам отсутствуют.

В этой связи верификация модели с учетом силовых или энергетических показателей является актуальной задачей исследования при разработке и верификации новых моделей ТС с всенаправленными колесами.

**Описание  
объекта исследования**

Объектом исследования является транспортное средство массой 118,7 кг с всенаправленно-колесным движителем (рис. 1, а). ТС пред-

назначено для выполнения логистических задач в урбанизированном пространстве, оно может использоваться в качестве внутрицехового и складского транспорта повышенной мобильности. ТС управляется оператором в зоне прямой видимости с помощью носимого пульта. Реализован выбор режима движения, режимы различаются максимальными скоростями, максимальная возможная скорость ТС составляет 2 м/с. Управление ТС (рис. 1, б) осуществляется воздействием на джойстики пульта, входные сигналы управления передаются с пульта на приемник по радиоканалу  $2,4 \cdot 10^9$  Гц. Далее

сигналы управления передаются на плату управления, программными средствами которой осуществляется фильтрация входных сигналов и вычисление задающего сигнала для каждого из четырех приводов. Задающий сигнал передается на инвертор (электронный регулятор скорости), работающий на базе программного обеспечения VescTool [13]. Инвертор по задающему сигналу осуществляет векторное (ориентированное на поле, FOC) управление бесколлекторным мотором постоянного тока, который через редуктор приводит в движение всенаправленное колесо.

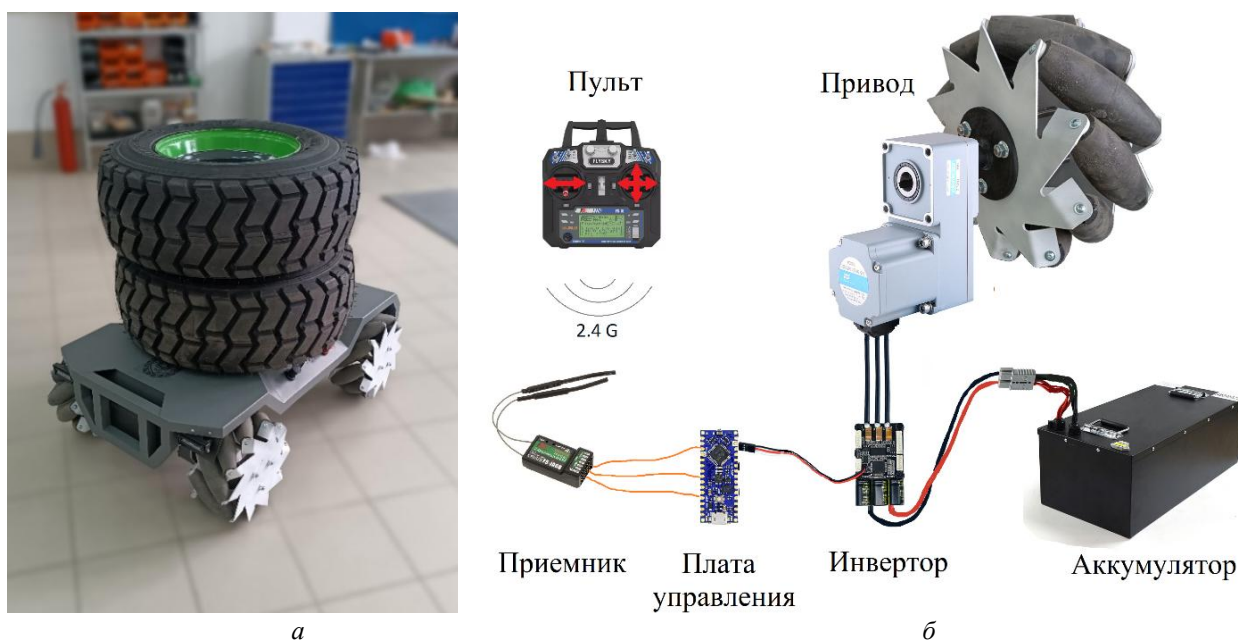


Рис. 1. Транспортное средство всенаправленными колесами: а – внешний вид с грузом; б – схема системы управления с приводом

### Натурные и виртуальные испытания

Методика проведения теоретических и экспериментальных исследований объединила четыре типа испытаний по оценке скоростных и динамических свойств ТС и его модели: фронтальное движение, боковое движение, диагональное движение, разворот на месте.

Испытания проводились в режиме движения с ограничением максимальной скорости 1,66 м/с. Правление движением осуществлялось автоматизировано, входные воздействия управления  $h_{\text{прямо}}$ ,  $h_{\text{бок}}$ ,  $h_{\text{поворот}}$ , соответствующие фронтальному, боковому и поворотному движениям задавались в системе управления (и ее модели) ступенчатыми функциями в соответствии с отсчетом времени. В ходе испытаний

фиксировались следующие величины:  $t$  – время, с;  $accX$ ,  $accY$ ,  $accZ$  – ускорение, действующее на геометрический центр ТС, м/с;  $\omega_{\text{пл\_экс}}$ ,  $\omega_{\text{пл\_экс}}$ ,  $\omega_{\text{зп\_экс}}$ ,  $\omega_{\text{зл\_экс}}$ , – угловые скорости валов колес, рад/с;  $P_{\text{Эпп\_экс}}$ ,  $P_{\text{Эпл\_экс}}$ ,  $P_{\text{Эзп\_экс}}$ ,  $P_{\text{Эзл\_экс}}$  – мощности тока в электродвигателях, Вт;  $W_z$  – угловая скорость поворота вокруг вертикальной оси, рад/с;  $S$  – пройденный путь, м;  $\gamma$  – пройденный угол поворота, рад.

### Результаты испытаний фронтального движения

Фрагменты натурального и виртуального испытаний фронтального движения представлены на рис. 2 и 3. Пройденный реальный путь ТС составил 6,9 м, виртуальный путь модели составил 6,72 м.

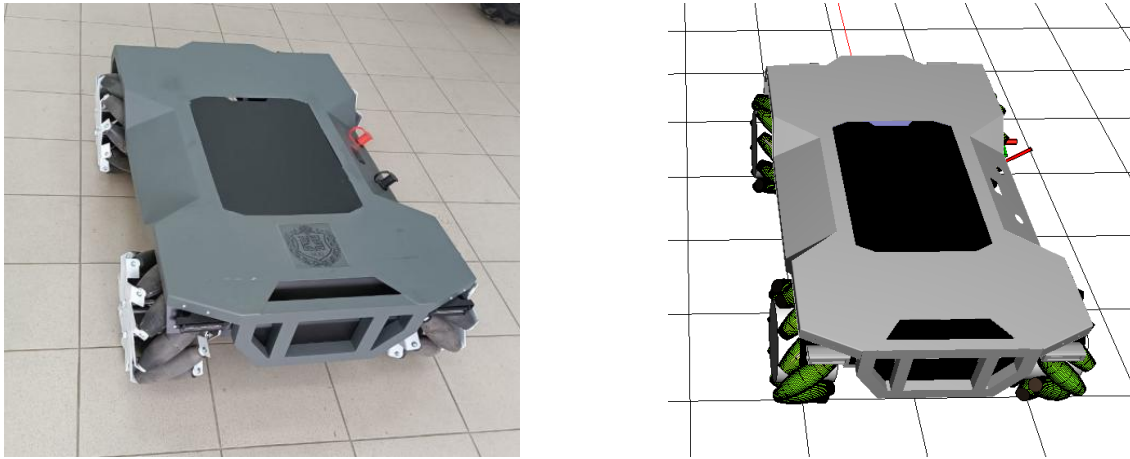


Рис. 2. Фрагменты испытаний фронтального движения

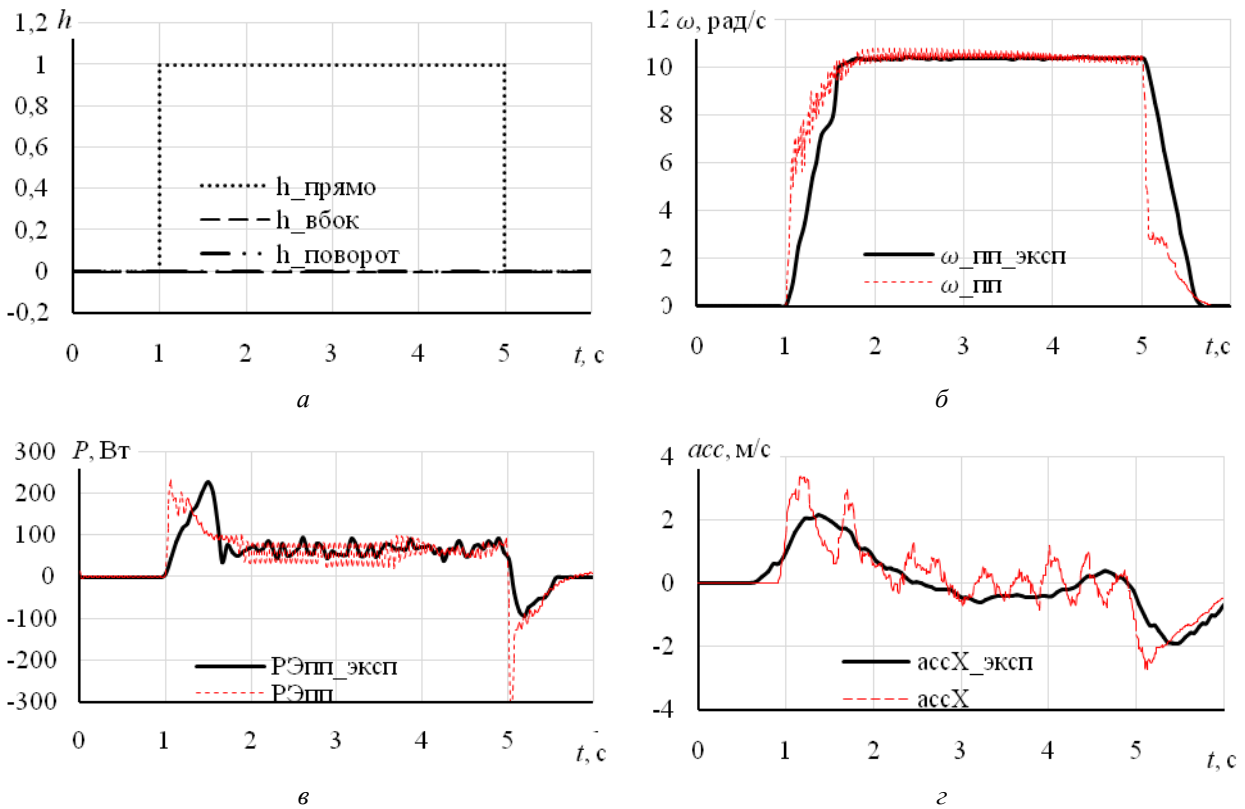


Рис. 3. Фрагменты испытаний тяговой динамики фронтального движения:  $a$  – входные воздействия управления;  $б$  – угловая скорость переднего правого колеса;  $в$  – электрическая мощность привода переднего правого колеса;  $г$  – фронтальное ускорение ТС

**Результаты испытаний бокового движения**

Фрагменты натурального и виртуального испытания бокового движения представлены на

рис. 4 и 5. Пройденный реальный путь ТС составил 5,75 м, виртуальный путь модели составил 5,97 м.

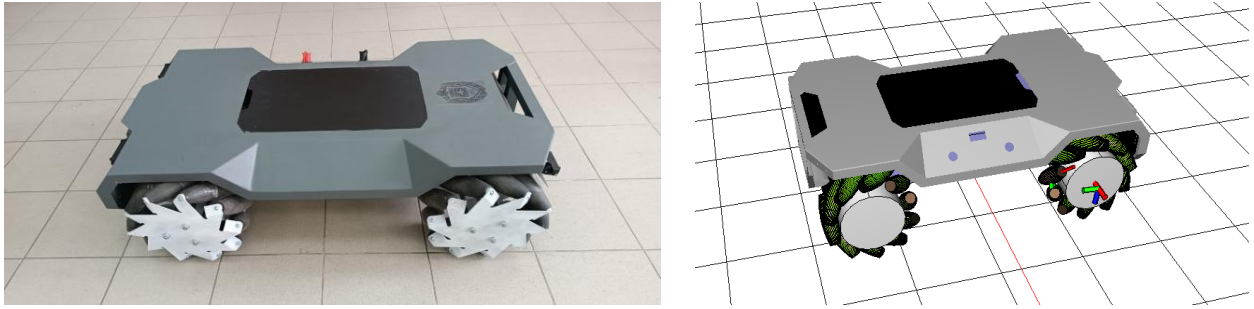


Рис. 4. Фрагменты испытаний бокового движения

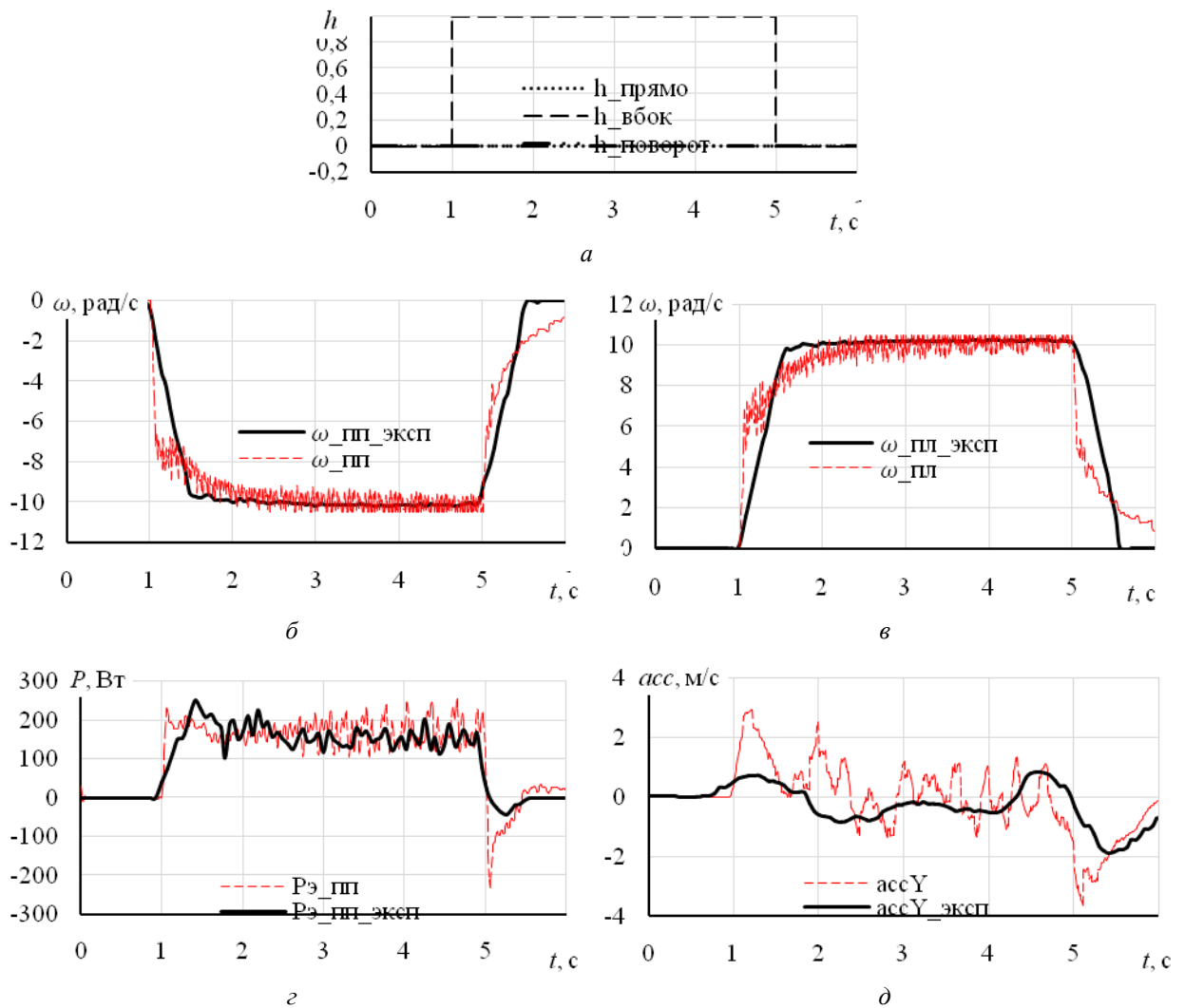


Рис. 5. Фрагменты испытаний тяговой динамики бокового движения:

$a$  – входные воздействия управления;  $б$  – угловая скорость переднего правого колеса;  $в$  – угловая скорость переднего левого колеса;  $г$  – электрическая мощность привода переднего правого колеса;  $д$  – боковое ускорение ТС

#### Результаты испытаний диагонального движения

Фрагменты натурного и виртуального испытания диагонального движения представлены на рис. 6 и 7. Пройденный реальный путь

ТС составил 4,61 м, виртуальный путь модели составил 4,45 м. Реальный угол курса движения к продольной оси ТС составил 0,70 рад, виртуальный угол курса – 0,66 рад (ожидаемый угол курса равен 0,79 рад).

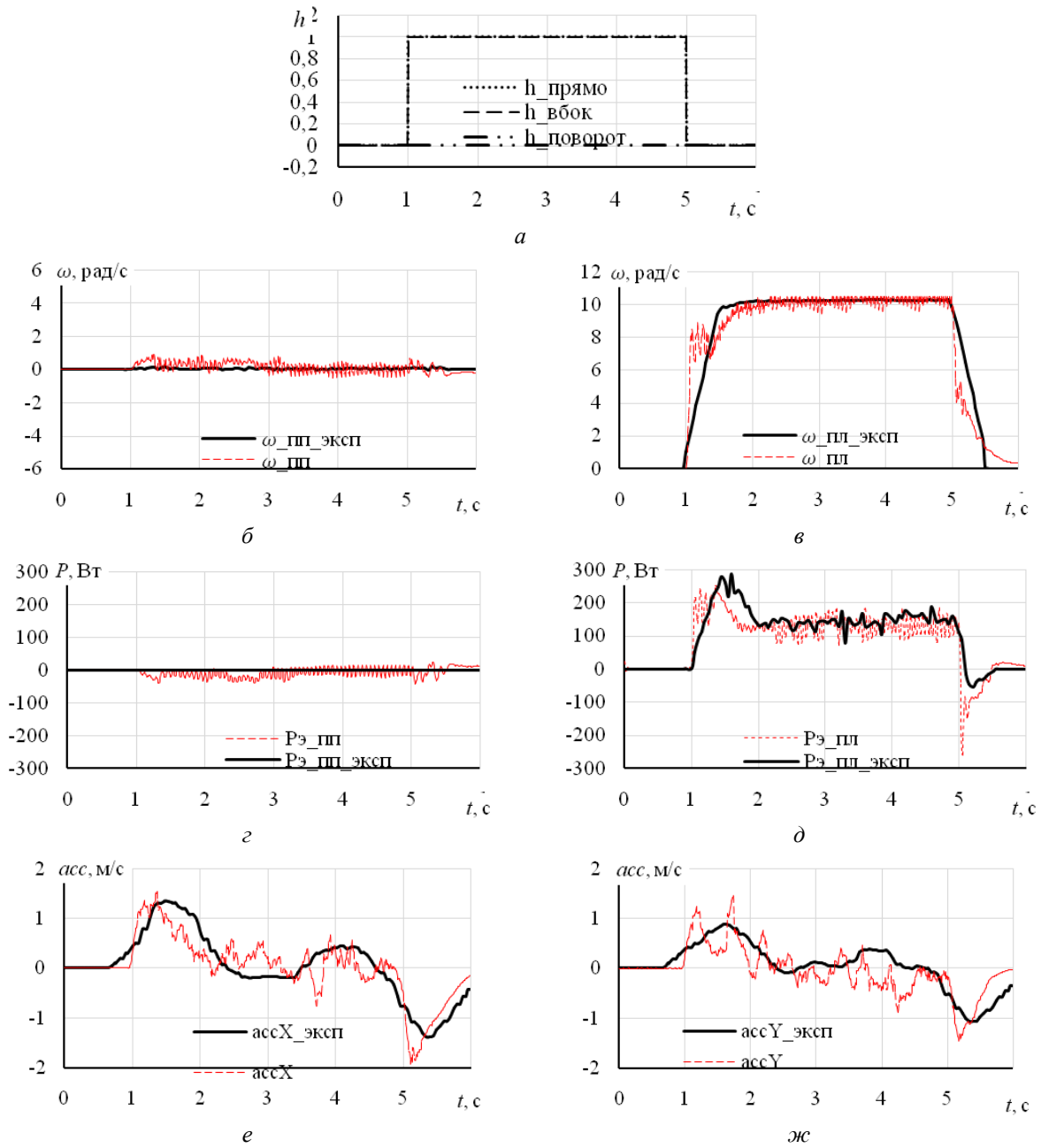


Рис. 6. Фрагменты испытаний тяговой динамики диагонального движения:

*а* – входные воздействия управления; *б* – угловая скорость переднего правого колеса; *в* – угловая скорость переднего левого колеса; *г* – электрическая мощность привода переднего правого колеса; *д* – электрическая мощность привода переднего левого колеса; *е* – фронтальное ускорение ТС; *ж* – боковое ускорение ТС

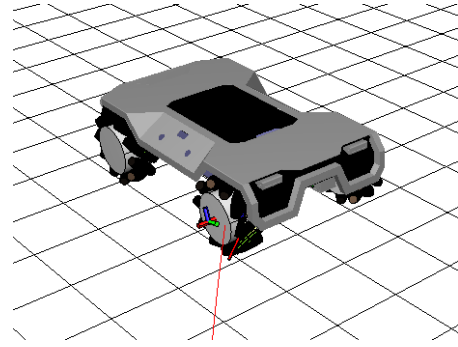


Рис. 7. Фрагменты испытаний диагонального движения

### Результаты испытаний разворота на месте

Фрагменты натурального и виртуального испытаний разворота на месте представлены на

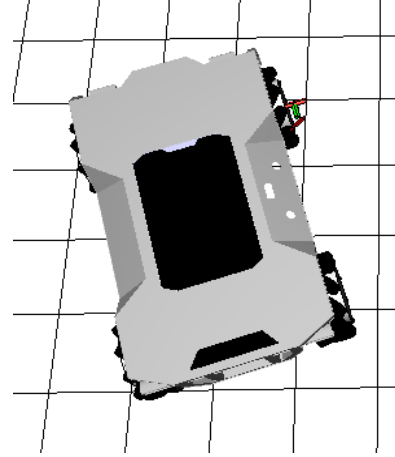


Рис. 8. Фрагменты испытаний разворота на месте

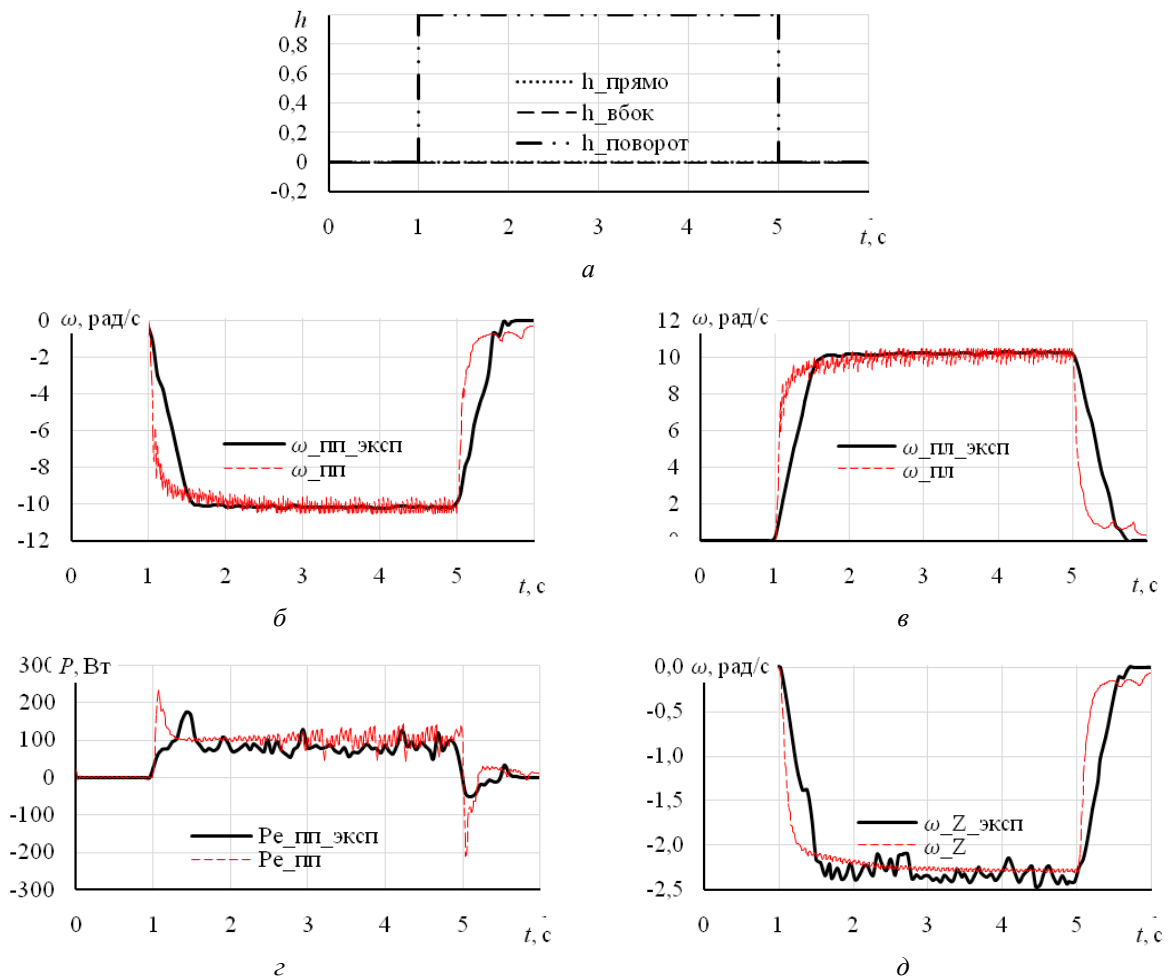


Рис. 9. Фрагменты испытаний тяговой динамики разворота на месте:

а – входные воздействия управления; б – угловая скорость переднего правого колеса; в – угловая скорость переднего левого колеса; г – электрическая мощность привода переднего правого колеса; д – угловая скорость разворота ТС

### Статистическая оценка результатов испытаний

Для обработки и обобщения выводов исследования необходимо использовать модельно-вероятностный подход к данным, при котором полученные в ходе экспериментов данные рассматриваются как выборки случайных величин [14; 15]. Данные виртуальных испытаний в данном исследовании рассматриваются как псевдослучайные величины. Вариацию этих данных можно получить, не изменяя входные параметры модели, а изменив только внутрен-

ние параметры модели – параметры численных методов интегрирования уравнений движения: шаг интегрирования, заданную погрешность, шаг представления результатов и др.

Получены оценки математических ожиданий [14] измеренных величин для промежутка времени 1,8–5 с, в котором движение было установившимся (рис. 10). Составлена парная выборка  $(x_i, y_i)$  математических ожиданий величин, полученных при натуральных испытаниях и величин, полученных при виртуальных испытаниях (рис. 11, а, б).

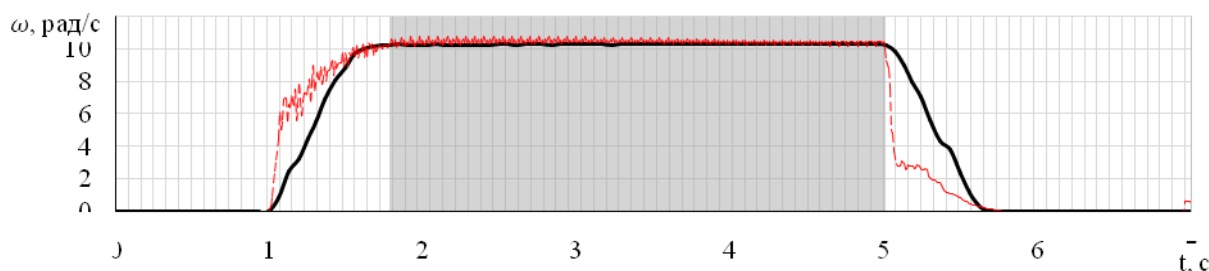


Рис. 10. Промежуток времени, в котором движение было установившимся для всех представленных испытаний

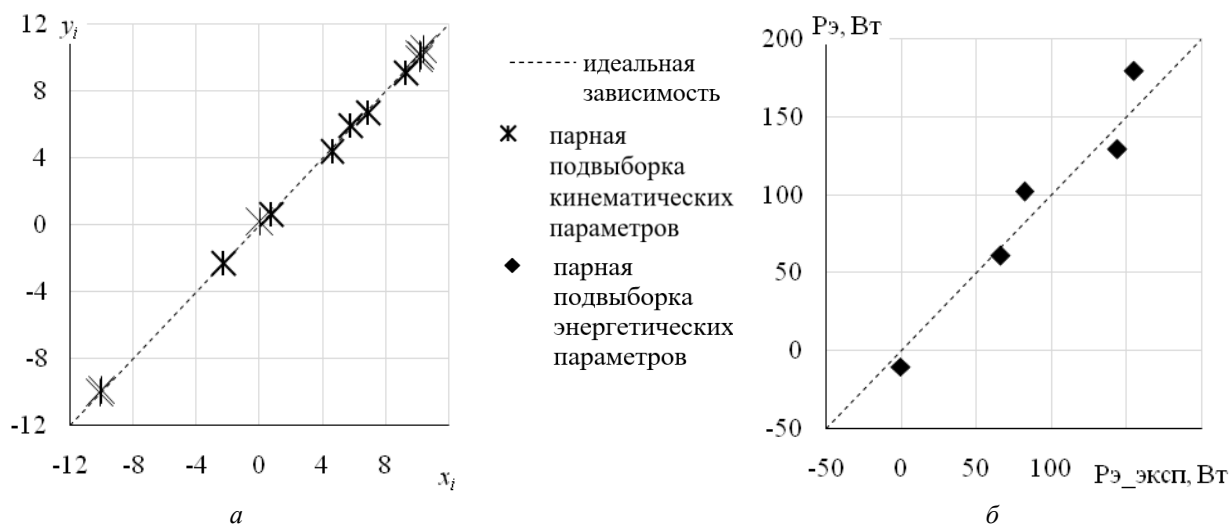


Рис. 11. Парные выборки математических ожиданий измеренных величин в установившемся режиме: а – подвыборка кинематических величин; б – подвыборка энергетических величин

Традиционное оценивание адекватности математической модели по критерию Фишера [15–17] неприменимо к экспериментальным выборкам с ненормально-распределенными погрешностями [14; 18]; помимо этого критерий Фишера устанавливает слишком жесткое требование для верификации динамической модели; ценность которой заключается в объяснительной способности, а ее точность вторична [19]. Поэтому для оценки адекватности дина-

мической модели применены методы корреляционного и регрессионного анализа. Адекватность динамической модели эквивалентна качеству регрессионной зависимости  $\bar{y}_i = x_i$  между членами парной выборки натуральных испытаний  $y_i$  и виртуальных испытаний  $x_i$ . Поэтому показателем качества приближения может служить близость коэффициента детерминации  $R^2$  к 1 [18; 20]. Коэффициент детерминации парной выборки определяется по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

Для регрессионной зависимости  $\bar{y}_i = x_i$  коэффициент детерминации имеет вид:

$$R^2 \Big|_{y_i=x_i} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

Коэффициент детерминации не является робастным, он чувствителен к выбросам (выделяющимся значениям  $(x_k, y_k)$ , которые далеки от остальных значений) [18; 20], поэтому необходимо исключать из выборок выбросы или делить выборку на несколько подвыборок. Парная выборка  $(x_i, y_i)$  разделена на две подвыборки: подвыборку кинематических величин (рис. 11, а) и подвыборку энергетических величин (рис. 11, б).

В таблице представлены показатели качества регрессионной зависимости  $\bar{y}_i = x_i$ , которые трактуются как показатели адекватности динамической модели ТС с всенаправленными колесами.

**Показатели адекватности динамической модели**

	Коэффициент детерминации
Кинематические параметры	0,999
Энергетические параметры	0,928

Модель ТС с всенаправленными колесами признана адекватной. Отклонение показателя качества регрессии от 1 для кинематических величин составляет менее 1 %, для энергетических величин составляет 7,2 %.

### Заключение

По результатам экспериментального и теоретического исследования ТС с всенаправленными колесами получено, что снижение качества приближения кинематических величин моделью составляет менее 1 %, снижение качества приближения энергетических величин моделью составляет 7,2 %.

Значения измеренных величин необходимы для качественной оценки эксплуатационных свойств ТС: оценки ускорений, усилий, передаваемых на корпус в процессе движения (они определяют работоспособность по критериям прочности и жесткости и надежность), курсовой и траекторной устойчивости ТС, теорети-

ческих радиусов поворота, скольжения в контакте с опорой, энергетических затрат на выполнение маневра. Верифицированная динамическая модель ТС с всенаправленными колесами позволяет дать качественную оценку эксплуатационных свойств на этапе проектирования новых ТС с всенаправленными колесами.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pallares, B., et al. Design and Construction of a Cost-Oriented Mobile Robot for Domestic Assistance // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54, № 13. – P. 293–298.
2. Eschmann, H., Ebel H., Eberhard P. Data-Based Model of an Omnidirectional Mobile Robot Using Gaussian Processes // IFAC-PapersOnLine/ – 2021. – Vol. 54, № 7. – P. 13–18.
3. Lyu, R., et al. EddyBot: A multichannel FPGA-based Eddy Current Testing mobile robot // Measurement. – 2025. – Vol. 242. – Article 115867.
4. Cai, Z., et al. Integration of an IoT sensor with angle-of-arrival-based angle measurement in AGV navigation: A reliability study // Journal of Industrial Information Integration. – 2024. – Vol. 42. – Article 100707.
5. Kirsch, Ch., Röhrig Ch. Global Localization and Position Tracking of an Automated Guided Vehicle // IFAC Proceedings Volumes. – 2011. – Vol. 44, № 1. – P. 14036–14041.
6. Peng, T., et al. Mechanical Design and Control System of an Omni-directional Mobile Robot for Material Conveying // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 56. – P. 412–415.
7. Manzl, P., Sereinig M., Gerstmayr J. A Mecanum wheel model based on orthotropic friction with experimental validation // Mechanism and Machine Theory. – 2024. – Vol. 193. – Article 105548.
8. Shafiq, M. U., et al. Real-time navigation of mecanum wheel-based mobile robot in a dynamic environment // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, № 5. – Article e26829.
9. Nakagawa, Y., Igo N.; Hoshino K. Controlling a Mecanum-Wheeled Robot with Multiple Swivel Axes Controlled by Three Commands // Sensors. – 2025. – № 3. – Article 709.
10. Kumar, P., Othman L., Merzouki R. Bond Graph Modeling of a Holonomic Mobile Platform with Four Mecanum Wheels // Conference: International Conference on Bond Graph Modeling (ICBGM 2018). – 2018. – P. 195–205.
11. Li, C., Li Z. Dynamic Modeling and Disturbance-Observer-Enhanced Control for Mecanum-Wheeled Vehicles Under Load and Noise Disturbance // Mathematics, 2025. – № 13. – Article 789.
12. Kilin, A. A., et al. Experimental investigations of a highly maneuverable mobile omniumwheel robot // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2017. – Vol. 14, № 6. – P. 1–9.
13. VESCPProject. – URL: [https://vesc-project.com/vesc\\_tool](https://vesc-project.com/vesc_tool) (дата обращения 24.11.2025).
14. Орлов, А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. – М.: Издательство «Экзамен». – 2004. – 672 с.
15. Основы научных исследований: учебник для вузов / В. Г. Кучеров [и др.]; под ред. В. Г. Кучерова. ВолгоГТУ. – Волгоград. 2004. – 304 с.
16. Ерещенко, Т. В. Планирование эксперимента [Электронный ресурс]: учебно-практическое пособие / Т. В. Ерещенко. – Текст электронный // М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Волгоград : ВолгГАСУ. – 2014. – 78 с.
17. Математическая статистика: учеб. для вузов / В. Б. Горяинов, И. В. Павлов, Г. М. Цветкова и др.; под

ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Изд.-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2001. – 424 с.

18. Орлов, А. И. Вероятностно-статистические модели корреляции и регрессии / А. И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. – 2020. – № 160. – С. 130–162.

19. Кубланов, М. С. Проверка адекватности математических моделей / М. С. Кубланов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 211 (1). – С. 29–36.

20. Орлов, А. И. Ошибки при использовании коэффициентов корреляции и детерминации / А. И. Орлов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84. № 3. – С. 68–72.

#### REFERENCES

1. Pallares, B., et al. Design and Construction of a Cost-Oriented Mobile Robot for Domestic Assistance // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol. 54, № 13. P. 293-298.

2. Eschmann, H., Ebel H., Eberhard P. Data-Based Model of an Omnidirectional Mobile Robot Using Gaussian Processes // IFAC-PapersOnLine/ 2021. Vol. 54, № 7. P. 13-18.

3. Lyu, R., et al. EddyBot: A multichannel FPGA-based Eddy Current Testing mobile robot // Measurement. 2025. Vol. 242. Article 115867.

4. Cai, Z., et al. Integration of an IoT sensor with angle-of-arrival-based angle measurement in AGV navigation: A reliability study // Journal of Industrial Information Integration. 2024. Vol. 42. Article 100707.

5. Kirsch, Ch., Röhrig Ch. Global Localization and Position Tracking of an Automated Guided Vehicle // IFAC Proceedings Volumes. 2011. Vol. 44, № 1. P. 14036-14041.

6. Peng, T., et al. Mechanical Design and Control System of an Omni-directional Mobile Robot for Material Conveying // Procedia CIRP. 2016. Vol. 56. P. 412-415.

7. Manzl, P., Sereinig M., Gerstmayr J. A Mecanum wheel model based on orthotropic friction with experimental validation // Mechanism and Machine Theory. 2024. Vol. 193. Article 105548.

8. Shafiq, M. U., et al. Real-time navigation of mecanum

wheel-based mobile robot in a dynamic environment // Heliyon. 2024. Vol. 10, № 5. Article e26829.

9. Nakagawa, Y., Igo N.; Hoshino K. Controlling a Mecanum-Wheeled Robot with Multiple Swivel Axes Controlled by Three Commands // Sensors. 2025. № 3. Article 709.

10. Kumar, P., Othman L., Merzouki R. Bond Graph Modeling of a Holonomic Mobile Platform with Four Mecanum Wheels // Conference: International Conference on Bond Graph Modeling (ICBGM 2018). 2018. P. 195-205.

11. Li, C., Li Z. Dynamic Modeling and Disturbance-Observer-Enhanced Control for Mecanum-Wheeled Vehicles Under Load and Noise Disturbance // Mathematics 2025. № 13. Article 789.

12. Kilin, A. A., et al. Experimental investigations of a highly maneuverable mobile omniwheel robot // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2017. Vol. 14, № 6. P. 1-9.

13. VESC Project. Cited: 24.11.2025. Available from: [https://vesc-project.com/vesc\\_tool](https://vesc-project.com/vesc_tool)

14. Орлов, А. И. Applied Statistics. Moscow: "Examen" Publishing House. 2004. 672 p.

15. Fundamentals of Scientific Research: A Textbook for Higher Education Institutions / V. G. Kucherov [et al.]; edited by V. G. Kucherov. Volgograd State Technical University (VolgSTU). – Volgograd. 2004. - 304 p.

16. Ereshenko, T. V. Planning of Experiment [Electronic Resource]: A Study Guide. — Volgograd : VolgGASU. 2014. 78 p.

17. Mathematical Statistics: Textbook for Higher Education Institutions / V.B. Goryainov, I.V. Pavlov, G.M. Tsvetkova et al. Edited by V.S. Zarubin, A.P. Krishchenko. Moscow: Publishing House of BMSTU. 2001. 424 p.

18. Орлов, А. И. Probabilistic-Statistical Models of Correlation and Regression // Polythematic Online Scientific Journal of KubSAU. 2020. No.160. P. 130-162.

19. Kublanov, M. S. Verification of Mathematical Models Adequacy // NauchnyiVestnik MG TU GA. 2015. No. 211 (1). P. 29–36.

20. Орлов, А. И. Errors in Using Correlation and Determination Coefficients // ZavodskayaLaboratoriya. DiagnostikaMaterialov. 2018. Vol.84. No. 3. P. 68-72.

Статья поступила в редакцию 11.02.2026, доработана 12.02.2026, подписана в печать 13.02.2026

The article was submitted 11.02.2026, revised 12.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 629.4.023.16

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-83-92

Научная статья  
Original article

**А. В. Евсеева, Н. М. Лазаренков, А. А. Долотов, П. В. Потапов, В. В. Шеховцов**  
**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ ДВИГАТЕЛЯ**  
**И ТРАНСМИССИИ СПЕЦИАЛЬНОГО МИКРОАВТОБУСА**  
**НА УРОВЕНЬ ШУМА В САЛОНЕ И В КАБИНЕ ВОДИТЕЛЯ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Виктор Викторович Шеховцов, shehovtsov@vstu.ru

**Аннотация.** На основе экспериментальных исследований авторов выполнен анализ влияния на общий уровень шума и его спектральные составляющие в салоне и в кабине водителя специального микроавтобуса шума двигателя (от основных и полуторных гармонических составляющих крутящего момента, от системы выхлопа) и трансмиссии (от перезацепления шестерен). В большинстве случаев анализ выявил превышение допустимого санитарными нормами уровня шума на отдельных спектральных составляющих. Результаты анализа представляют интерес для проведения конструктивных мероприятий по совершенствованию системы шумоизоляции кабины и салона микроавтобуса.

**Ключевые слова:** шум агрегатов автомобиля, уровень шума, шум двигателя, шум трансмиссии, санитарные нормы, допустимый уровень шума

**Для цитирования:** Евсева А. В., Лазаренков Н. М., Долотов А. А., Потапов П. В., Шеховцов В. В. Анализ влияния возмущающих воздействий от двигателя и трансмиссии специального микроавтобуса на уровень шума в салоне и в кабине водителя. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 83–92. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-83-92.

**Информация об авторах:**

**Аполлинария Владимировна Евсева** – аспирант кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0006-9832-8304>

e-mail: [evseeva\\_apollinariya@mail.ru](mailto:evseeva_apollinariya@mail.ru)

**Никита Михайлович Лазаренков** – аспирант кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

e-mail: [nikita86region@gmail.com](mailto:nikita86region@gmail.com)

**Александр Александрович Долотов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-6011-4064>

e-mail: [dolotov\\_aleks@mail.ru](mailto:dolotov_aleks@mail.ru)

**Павел Викторович Потапов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0001-6645-6033>;

e-mail: [paulflinx@gmail.com](mailto:paulflinx@gmail.com)

**Виктор Викторович Шеховцов** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-5207-8972>

e-mail: [shehovtsov@vstu.ru](mailto:shehovtsov@vstu.ru)

**Вклад авторов:**

**А. В. Евсева** – проведение экспериментальных исследований, обработка результатов.

**Н. М. Лазаренков** – обработка результатов исследований.

**А. А. Долотов** – проведение экспериментальных исследований, анализ результатов.

**П. В. Потапов** – разработка методики, сбор данных, оформление материалов.

**В. В. Шеховцов** – определение концепции исследования, написание статьи.

*A. V. Evseeva, N. M. Lazarenkov, A. A. Dolotov, P. V. Potapov, V. V. Shekhovtsov*

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ENGINE AND TRANSMISSION  
DISTURBING EFFECTS OF A SPECIAL MINIVAN ON NOISE LEVEL  
IN THE INTERIOR AND IN THE DRIVER'S CABIN**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Viktor V. Shehovtsov, [shehovtsov@vstu.ru](mailto:shehovtsov@vstu.ru)

**Abstract.** This paper presents analysis based on experiments performed by authors of influence of engine noise (by main and sesquialteral harmonic components of torque, exhaust system) and transmission (gearing) on general noise level and its spectral components in the interior and driver's cabin of special minivan. In most cases analysis shows exceeding the permissible sanitary limits for noise level at individual spectral components. Analysis results could be useful for design improvements of minivan interior and cabin noise insulation.

**Keywords:** car aggregates noise, noise level, engine noise, transmission noise, sanitary standards, permissible noise level

**For citation:** Evseeva A. V., Lazarenkov N. M., Dolotov A. A., Potapov P. V., Shekhovtsov V. V. Analysis of the influence of engine and transmission disturbing effects of a special minivan on noise level in the interior and in the driver's cabin. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 1(54): 83–92. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-83-92.

**Information about the authors:**

**Аполлинария В. Евсева** – postgraduate student at the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU.

e-mail: [evseeva\\_apollinariya@mail.ru](mailto:evseeva_apollinariya@mail.ru)

**Nikita M. Lazarenkov** – postgraduate student at the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU.

e-mail: [nikita86region@gmail.com](mailto:nikita86region@gmail.com)

**Alexander A. Dolotov** – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU.

e-mail: [dolotov\\_aleks@mail.ru](mailto:dolotov_aleks@mail.ru)

**Pavel V. Potapov** - Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU.

e-mail: [paulflinx@gmail.com](mailto:paulflinx@gmail.com)

**Viktor V. Shehovtsov** – Professor, Dr. Sci. (Tech), Professor of the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU.

e-mail: shehovtsov@vstu.ru

**Contribution of the authors:**

**Аpollinariya V. Evseeva** – experimental research, results processing.

**Nikita M. Lazarenkov** – results processing.

**Alexander A. Dolotov** – experimental research, results analysis.

**Pavel V. Potapov** – method development, data review, materials processing.

**Viktor V. Shehovtsov** – idea development, writing the article.

**Введение**

В Российской Федерации для транспортировки пациентов от мест проживания до стационарных лечебных заведений применяются машины «Скорой медицинской помощи», в качестве которых наиболее часто используются отечественные микроавтобусы на базе «Газелей» разных модификаций и лет выпуска или микроавтобусы зарубежного производства того же класса. Это серийно выпускаемые машины, изначальным предназначением которых являлись пассажирские перевозки. Салон этих машин оснащается стеллажами под медицинское оборудование и приборы, кушеткой для пациента и креслами для медперсонала и сопровождающего. При этом не вносятся конструктивные изменения в силовую передачу и ходовую систему для приспособления пассажирского микроавтобуса к транспортировке больных людей. Тем временем практика показывает [1; 2], что вибро-шумоизоляция салона этих машин оказывается недостаточной и не соответствует санитарным нормам [3; 4; 5], вследствие чего во время переездов и пациенты, и медперсонал подвергаются повышенным шумо-вибровоздействиям, что отрицательно сказывается на состоянии здоровья пациента, приводит к повышению усталости медперсонала и водителя, а также к сбоям в работе медицинского оборудования. Поэтому актуальны работы, направленные на поиск путей снижения шумо-вибронегативности салона таких машин.

**Источники шумов и вибраций  
в составе автомобиля**

*Двигатель и его агрегаты*

Двигатель является одним из основных источников шума и вибраций. При реализации рабочего процесса в каждом из его цилиндров при возгорании топливовоздушной смеси происходит взрывообразное повышение давления, воздействующее на гильзы цилиндров, через них – на корпус и головку двигателя, на поршень, шатун и коленвал. При деформациях всех этих деталей генерируются колебания в диапазоне частот от средне- до высокочастотных.

Известно, что крутящий момент двигателя внутреннего сгорания даже на одной частоте

вращения не является постоянной величиной. При аналитическом описании он представляется функцией, в которую включаются гармонические составляющие крутящего момента, имеющие частоты изменения, кратные частоте вращения коленвала, а также полуторные частоты изменения – так называемые «полуторные гармоники». Колебания с этими частотами (от «газовых сил») от коленвала передаются всему силовому валопроводу. Наибольшие амплитуды имеют колебания с несколькими первыми (или полуторными) гармоническими составляющими крутящего момента; при этом генерируются шумы и вибрации с соответствующими частотами.

Наряду с газовыми, на коленчатый вал двигателя также периодически воздействуют инерционные силы и моменты, образующиеся при возвратно-поступательном движении деталей цилиндра-поршневых групп. Их амплитуды зависят от частоты вращения коленвала, а у высокооборотных двигателей они обычно превышают амплитуды газовых сил.

Импульсный характер воздействия на коленвал нагрузок от газовых и инерционных сил вызывает крутильные колебания в материале вала, которые далее распространяются по силовому валопроводу, вызывая дополнительную динамическую нагруженность и деформации деталей с генерацией средне- и высокочастотных колебаний.

На переходных режимах движения автомобиля – разгон, торможение, поворот – изменяются крутящий момент и частота вращения вала двигателя. При изменении крутящего момента соответственно изменяется и реактивный момент на опорах двигателя; при этом колебательные нагрузки через опоры передаются на раму автомобиля, вызывая ее деформацию и генерацию низкочастотных колебаний.

Одними из самых значимых источников генерации шума являются системы впуска воздуха и выпуска выхлопных газов, при этом существенно более значимым источником является выхлопная система. У четырехтактного двигателя рабочий цикл совершается за два оборота вала, поэтому у четырехцилиндрового двигателя

ля такт выпуска в одном из цилиндров осуществляется за половину оборота вала, то есть частота выхлопа равна удвоенной частоте вращения коленвала. Шум генерируется также во время открытия-закрытия клапанов механизма газораспределения.

Зубчатый приводной ремень также является одним из значимых источников шума. При его работе происходит контакт каждого из зубчиков со шкивами приводимых агрегатов. При нагружении они деформируются, часть ремня до шкива испытывает деформацию растяжения, при сходе со шкива – сжатия за счет упругости материала, и так с большой частотой, которая зависит от длины участков ремня и диаметра шкивов; при этом генерируются как среднечастотные, так и высокочастотные шумы.

Шум генерируется также агрегатами, приводимыми ремнем, при этом частоты его составляющих зависят от диаметров шкивов генератора, масляного, водяного и топливного насосов.

Существенный вклад в шумовую картину двигателя вносит вентилятор. Основная составляющая шума, генерируемого при работе, равна частоте вращения его вала. Следующая составляющая зависит от количества лопаток. При практически ударном взаимодействии плоскости лопатки с потоком воздуха совершаются изгибные колебания с малыми амплитудами и высокими частотами, и излучается шум соответствующей частоты.

При прохождении по трубопроводам двигателя потоков топлива, масла, воздуха и охлаждающей жидкости генерируются аэро-гидродинамические шумы. Причинами их генерации являются вихревые процессы в потоке рабочей среды; колебания среды, вызываемые вращением лопастных колес; пульсации давления рабочей среды; колебания среды, вызываемые неоднородностью потока, и так далее. В трубопроводах с жидкостями к этим источникам шума добавляются кавитационные процессы. Частоты излучаемых при этом шумов находятся в диапазоне от средне- до высокочастотных.

#### *Трансмиссия*

Во время движения автомобиля шум излучают все узлы трансмиссии. На установившихся режимах движения шум излучается от переацепления зубьев шестерен в коробке передач и главной передаче, от всех задействованных подшипников, от крутильных и изгибных колебаний в валопроводе. На переходных режимах

шум излучается при изменениях нагруженности валопровода во время изменений крутящего момента двигателя, при включении-выключении передач, тормозов, муфты сцепления. Во время торможения имеют место вибрации и шум при первичном контакте фрикционных элементов, высокочастотные колебания и шум при относительном проскальзывании трущихся поверхностей и т. д. В совокупности шумовое излучение трансмиссии представляет собой широкополосный случайный процесс с множеством составляющих с разными амплитудами и частотами.

#### *Шины*

Шум шин является одним из основных составляющих общего уровня шума автомобиля. При взаимодействии шины с неровностями опорной поверхности происходит деформация слоев резины и корда в местах контакта с поверхностью и с диском колеса с генерацией колебаний акустического диапазона. Особенно велико шумоизлучение шин при высоких скоростях движения, когда усиливается шум при обтекании колес встречным потоком воздуха (так называемый «вихревой шум»). В соответствии с данными, проведенными в диссертации [6], вклад в общий уровень шума автомобиля составляющей от шума шин может составлять до 50 %.

#### *Кузов салона*

Металлический коробчатый кузов салона микроавтобуса представляет собой своеобразный резонатор, реагирующий на поступающие вибрационные воздействия и генерирующий при этом вторичные шумы. Боковые панели кузова, потолка и пола являют собой своеобразные мембраны. На полу закреплены через свою подвеску сиденья медперсонала и сопровождающего, при инерционных нагрузках во время движения они деформируют мембрану пола, что сопровождается излучением шума. Панели задних дверей также являются мембранами, на колебания которых влияют, кроме прочего, особенности их крепления, конструкции петель и замков каждой створки. Все эти элементы конструкции генерируют собственные шумы и отзываются на поступающие воздействия, генерируя вторичное шумоизлучение.

#### *Рама*

При комплексных мультисоставных воздействиях на раму в широком диапазоне амплитуд со стороны ходовой системы и подвески, со стороны из закрепленных на раме агрега-

тов и кузова микроавтобуса ее элементы подвергаются деформациям кручения и растяжения-сжатия, при которых генерируются шумы. Амплитуды деформаций невелики, так как жесткость рамы достаточно высокая, поэтому частоты генерируемых шумов находятся в диапазоне от среднечастотных до высокочастотных.

#### *Встречный поток воздуха*

Аэродинамический шум при обтекании микроавтобуса встречным потоком воздуха во время движения также вносит существенный вклад в формирование общего уровня шума в салоне и в кабине водителя. Его величина находится от скорости движения в квадратичной зависимости и особенно увеличивается при скоростях движения свыше 90 км/час [6].

#### **Постановка задачи**

Из предыдущего анализа следует, что на процесс формирования общего уровня шума в салоне микроавтобуса и в кабине водителя имеет влияние множество факторов, изменение которых носит случайный характер. Учет вкла-

да каждого из факторов представляется задачей чрезвычайно высокой размерности и сложности, причем вклад некоторых из них может быть ничтожно малым, поэтому в настоящей работе поставлена задача выполнить анализ вклада в формирование общего уровня шума таких основных источников, как шум двигателя на номинальном режиме работы (от гармонических составляющих крутящего момента и системы выхлопа), и шум от переацепления зубчатых передач в трансмиссии.

#### **Определение частот основных воздействий**

Авторским коллективом выполнен ряд экспериментальных исследований уровня шума в салоне и на рабочем месте водителя микроавтобусов Ford Transit и Mercedes-Benz Sprinter (рис. 1), использующихся в качестве автомобилей «Скорой медицинской помощи» в одном из районов Волгограда, при движении по одному из типовых маршрутов транспортировки пациентов.



а



б

Рис. 1. Микроавтобусы:  
а – Ford Transit; б – Mercedes-Benz Sprinter

Оба автомобиля оборудованы трехвальными механическими коробками передач классической компоновки. Исследования проводились при передвижении на четвертой (прямой) передаче, следовательно, уровень шума от переацепления шестерен в коробке передач пренебрежимо мал, поскольку они вращаются без нагрузки. В этом случае основным источником шума от переацепления шестерен является главная передача. Для каждого из автомобилей рассчитано значение частот возмущающих воздействий, вызванных переацеплением шестерен в главной передаче:

Ford Transit:

$$\omega = \frac{z \cdot n}{60} = \frac{13 \cdot 2000}{60} = 433,33 \text{ Гц} \quad (1)$$

где  $z$  – число зубьев ведущей шестерни главной передачи,  $n$  – частота вращения шестерни, об/мин.

Mercedes Sprinter:

$$\omega = \frac{z \cdot n}{60} = \frac{11 \cdot 2000}{60} = 366,67 \text{ Гц.} \quad (2)$$

Автомобили оснащены четырехтактными четырехцилиндровыми двигателями. Замеры уровня шума проводились при частоте вращения коленчатого вала 2000 об/мин. В табл. 1

приведены значения частот возмущающих воздействий от гармонических составляющих крутящего момента двигателя (от половинной до четвертой) и частоты возмущающих воздействий от переацепления зубьев главной передачи.

Частота шума выхлопа совпадает со второй гармоникой 66,67 Гц, так как у четырехтактных четырехцилиндровых двигателей такт выпуска в одном из цилиндров происходит каждые пол оборота коленчатого вала.

Таблица 1

Частоты возмущающих воздействий

Автомобиль	Шум от ГП, Гц	Шум от гармонических составляющих крутящего момента двигателя, Гц							
		Номера гармоник							
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Ford Transit	433,33	16,67	33,33	50,00	66,67	83,33	100,00	116,66	133,32
Mercedes Sprinter	366,67								

Таким образом, следует определить влияние на формирование общего уровня шума акустических колебаний с частотами 16,67, 33,33, 50,00, 66,67, 83,33, 110,00, 116,66, 133,32, 366,67 и 433,33 Гц.

#### Экспериментальные исследования уровня внутреннего шума

Для получения картины шумового загрязнения салона и кабины водителя специальных микроавтобусов «Скорая медицинская помощь» (рис. 1) выполнен комплекс экспериментальных исследований общего уровня шума и его спектральных составляющих в третьеклассном спектре частот [7; 8].

Исследования выполнялись во время движения по трассе транспортировки больного в кабине водителя, в салоне – на месте кушетки больного и на месте сидения врача. Для исследований использовался SVAN 912M – комбинированный прибор, который является шумомером, виброметром и анализатором спектра (рис. 2).

Для получения статистической картины шумового поля в кабине и салоне выполнено по десять замеров общего уровня внутреннего шума и его спектральных составляющих на каждом выше указанном месте.

#### Результаты исследований

На графиках рис. 3 представлены обобщенные для десяти замеров величины уровня шума на каждой из частот, перечисленных в табл. 1, в кабине водителя микроавтобусов и в салоне – на кушетке пациента и на сиденье врача. Пре-

рывистой линией показана зависимость допускаемого уровня шума на каждой частоте, сплошной линией – зависимость, полученная в результате замеров, вертикальными линиями показаны величины уровня шума на каждой из рассматриваемых частот (слева направо – от половинной до четвертой гармоники двигателя, последняя линия справа показывает величину уровня шума от переацепления шестерен).



Рис. 2. Шумомер и спектроанализатор SVAN 912M

В табл. 2 приведены замеренные и допускаемые санитарными нормами [9] значения уровня шума на каждой из рассматриваемых частот.

Таблица 2

## Замеренные и допускаемые значения уровня шума

Номера гармоник двигателя								Перезацепление шестерен
0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
Уровень шума в кабине микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter, Дб								
39,72	39,76	39,02	38,52	38,06	38	37,19	36,13	35,04
Уровень шума в кабине микроавтобуса Ford Transit, Дб								
90,76	86,63	79	78	76	70,51	67,57	65,92	58,00
Уровень шума на кушетке пациента микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter, Дб								
92,69	87,55	84	79	78,46	75,38	70	68	62,67
Уровень шума на кушетке пациента микроавтобуса Ford Transit, Дб								
89,56	84,87	77,08	75,63	72,15	68,07	65,01	62,5	55,00
Уровень шума на сиденье врача микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter, Дб								
91,82	89,31	83,89	79	77,44	76,28	71,62	69,48	62,34
Уровень шума на сиденье врача микроавтобуса Ford Transit, Дб								
88,72	80,63	74,69	73,85	66,2	65,04	62,31	61,25	53,85
Допускаемый уровень внутреннего шума на частотах, Дб								
	93	83	79	74	72	70	63	60

**Анализ результатов***Анализ шумозащитности рабочего места водителя*

Самая высокая защита от шума обеспечивается на рабочем месте водителя микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter – уровень шума в кабине на каждой из рассматриваемых частот, генерируемых двигателем и трансмиссией, не превышает 40 Дб.

Совсем другая картина наблюдается в кабине микроавтобуса Ford Transit – шум от двух гармоник двигателя, двухсполовинной и четвертой, превышает допускаемый санитарными нормами на 2 и 3 Дб соответственно. Если огибающая, характеризующая уровень шума на рассматриваемых частотах в кабине микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter, далеко, как минимум на 30 Дб отстоит от огибающей, характеризующей допускаемый уровень шума на этих частотах (рис. 3, а), то такая огибающая для кабины микроавтобуса Ford Transit почти сливается с огибающей допускаемого уровня (рис. 3, б). Таким образом, шумозащита рабочего места водителя микроавтобуса Ford Transit обеспечивается по минимуму.

*Анализ шумозащитности кушетки пациента*

Уровень шума на кушетке пациента микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter (рис. 3, в) на-

чиная с полуторной гармоникой двигателя по четвертую (за исключением второй и трехполовинной) превышает допустимый уровень на величину от 1 до 5 Дб (четвертая гармоника). Уровень шума от перезацепления шестерен также на 2,67 Дб превышает допускаемый санитарными нормами.

На кушетке пациента микроавтобуса Ford Transit (рис. 3, г) уровень шума от гармоник двигателя на всех рассматриваемых частотах ниже допускаемого на величину от 1 до 6 Дб; также на 2 Дб ниже уровень шума от трансмиссии. Таким образом, кушетка пациента микроавтобуса Ford Transit лучше защищена от шума, чем кушетка пациента микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter.

*Анализ шумозащитности сиденья врача*

Что касается шумозащиты места сидения врача в салоне микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter (рис. 3, д), то с двухсполовинной по четвертую гармоникой двигателя эта защита не отвечает санитарным нормам, и превышение уровня шума наблюдается в пределах от 1,62 до 6,48 Дб, то есть существенно. Также на 2,34 Дб превышен уровень шума от перезацепления шестерен в трансмиссии.

Место сидения врача в салоне микроавтобуса Ford Transit (рис. 3, е) защищено от шума существенно лучше – ни на одной из рассмат-

риваемых частот уровень шума не превышает допустимый и показывает значения, меньшие допустимого от 1,5 до 12 Дб. Также ниже до-

пускаемого (примерно на 6 Дб) оказался уровень внутреннего шума от переацепления шестерен главной передачи.

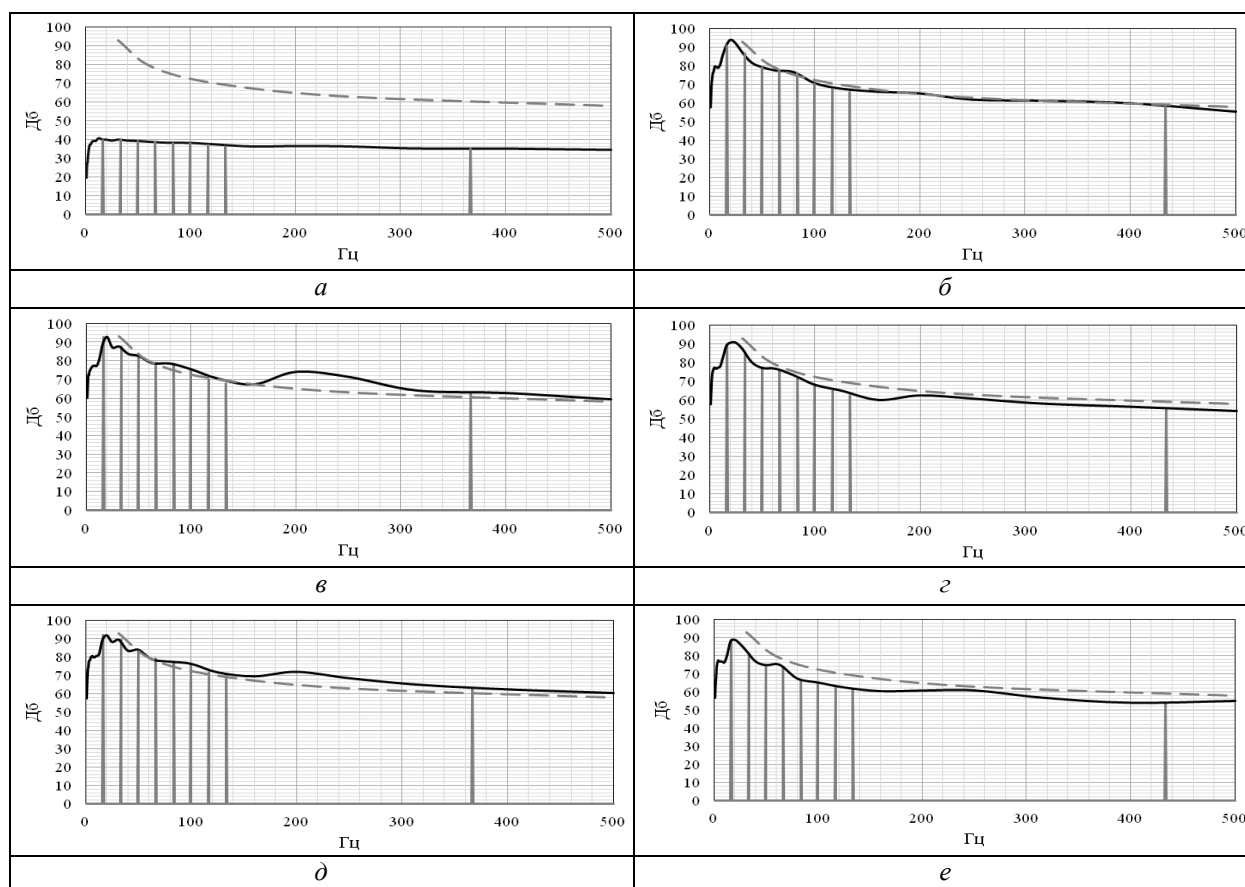


Рис. 3. Результаты замеров:

*a* – в кабине микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter; *б* – в кабине микроавтобуса Ford Transit; *в* – на кушетке пациента микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter; *г* – на кушетке пациента микроавтобуса Ford Transit; *д* – на сиденье врача микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter; *е* – на сиденье врача микроавтобуса Ford Transit

Таким образом, лучшая защита от шума на рассматриваемых частотах обеспечивается кабиной микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter, а лучшая защита салона – конструкцией кузова микроавтобуса Ford Transit.

В результате анализа авторами предложен ряд новых технических решений упругого крепления кузова микроавтобуса к раме [10; 11; 12; 13; 14], позволяющих снизить вибронгруженность кузова во время движения, а также выполнить ряд расчетных исследований [15] на основе разработанных динамических и математических моделей микроавтобуса для анализа характеристик системы виброзащиты салона [16].

#### Выводы

1. Рассмотрены источники генерации шумов во время движения агрегатами автомобиля (двигателем, трансмиссией и ходовой системой),

влияющие на формирование шумового поля в кабине водителя и в салоне микроавтобуса.

2. Выполнен комплекс экспериментальных исследований уровня общего шума и его спектральных составляющих в кабине и в салоне (на кушетке пациента и на сиденье врача) микроавтобусов Mercedes-Benz Sprinter и Ford Transit, используемых в качестве автомобилей «Скорой медицинской помощи», при транспортировке пациента по одному из типовых маршрутов.

3. Выполнен анализ соответствия санитарным нормам уровней шума в кабине водителей и в салоне микроавтобусов с частотами, соответствующими частотам гармонических составляющих крутящего момента двигателя, частоте выхлопа и частоте переацепления шестерен в трансмиссии. Результаты анализа свидетельствуют о том, что примерно в полови-

не случаев уровень шума на рассматриваемых частотах превышает допускаемый санитарными нормами.

4. Сравнение систем шумозащиты кабин и салонов микроавтобусов говорит о том, что лучшая защита от шума на рассматриваемых частотах обеспечивается кабиной микроавтобуса Mercedes-Benz Sprinter, а лучшая защита салона – конструкцией кузова микроавтобуса Ford Transit.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Удиванов, Е. С. Анализ вертикальных виброускорений салона автомобиля скорой медицинской помощи / Е. С. Удиванов // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 25-29 апреля 2022 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолГТУ, Отдел координации научных исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. – Волгоград, 2022. – С. 110–111.

2. Вибрации в конструкциях автомобилей скорой медицинской помощи / Е. С. Удиванов, М. В. Ляшенко, В. В. Шеховцов, Е. В. Клементьев, А. И. Искалиев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 2 (39). – С. 45–50.

3. ГОСТ 33555-2015. Межгосударственный стандарт. Автомобильные транспортные средства. Шум внутренний. Допустимые уровни и методы испытаний. – М., Стандартинформ, 2015. – 19 с.

4. ГОСТ 31299-2005 (ИСО 11957:1996). Межгосударственный стандарт. Шум машин. Определение звукоизоляции кабин. Испытания в лаборатории и на месте установки – М., Стандартинформ, 2007. – 15 с.

5. ГОСТ 30691-2001 (ИСО 4871-96) Межгосударственный стандарт. Шум машин. Заявление и контроль значений шумовых характеристик (ИСО 4871:1996 «Акустика. Заявление и подтверждение значений звукового излучения машин и оборудования», MOD). – Минск, Международный совет по стандартизации и унификации, 2001. – 16 с.

6. Долотов, А. А. Вероятностная оценка шумности легковых автомобилей – дисс. ...к.т.н. – Волгоград, ВолГТУ, 2022 г. – 169 с.

7. Евсеева, А. В. Экспериментальные исследования уровня шума в салоне специального микроавтобуса / А. В. Евсеева, Н. М. Лазаренков // XXX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 15 сентября – 9 ноября 2025 г.): сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолГТУ [и др.]. – Волгоград, 2025. – С. 69–70.

8. Экспериментальные исследования уровня шума в салоне специального микроавтобуса / З. А. Годжаев, В. В. Шеховцов, П. В. Потапов, Е. В. Клементьев, А. А. Долотов, А. В. Евсеева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 5 (373). – С. 229–237. – DOI: 10.33979/2073-7408-2025-373-5-229-237.

9. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31.10.1996 № 36. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 11 с.

10. Евсеева, А. В. Конструктивные мероприятия по совершенствованию виброзащиты салона микроавтобусов

скорой помощи / А. В. Евсеева // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16 сентября – 15 ноября 2024 г.): сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолГТУ [и др.]. – Волгоград, 2024. – С. 59.

11. Совершенствование устройства крепления кузова к раме автомобиля скорой медицинской помощи / Е. В. Клементьев, В. В. Шеховцов, П. В. Потапов, Н. С. Соколов-Добрев, Е. С. Удиванов, А. В. Евсеева, Н. М. Лазаренков // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 1 (50). – С. 71–77. – DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-71-77.

12. Новые технические решения устройства крепления кузова к раме микроавтобуса «Скорая помощь» / З. А. Годжаев, В. В. Шеховцов, П. В. Потапов, Е. В. Клементьев, А. А. Долотов, А. В. Евсеева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 4 (372). – С. 39–46. – DOI: 10.33979/2073-7408-2025-372-4-39-46.

13. П. м. 231722 Российская Федерация, МПК G01M 13/02 Виброизолирующее крепление кузова к раме транспортного средства / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, Е. В. Клементьев, А. В. Евсеева, Е. С. Удиванов, А. И. Искалиев; ФГБОУ ВО ВолГТУ. – 2025.

14. П. м. 231736 Российская Федерация, МПК G01M 13/02 Виброизолирующее крепление кузова к раме транспортного средства / В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, Е. В. Клементьев, А. В. Евсеева, Е. С. Удиванов, А. И. Искалиев; ФГБОУ ВО ВолГТУ. – 2025.

15. Расчетные исследования с целью выбора параметров упругой характеристики виброизоляторов салона микроавтобуса «Скорая помощь» / З. А. Годжаев, В. В. Шеховцов, Н. С. Соколов-Добрев, П. В. Потапов, Е. В. Клементьев, А. А. Долотов, А. В. Евсеева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 4 (372). – С. 30–38. – DOI: 10.33979/2073-7408-2025-372-4-30-38.

16. Разработка динамической и математической моделей микроавтобуса скорой медицинской помощи для анализа характеристик системы виброзащиты салона / Е. В. Клементьев, В. В. Шеховцов, П. В. Потапов, Н. С. Соколов-Добрев, Е. С. Удиванов, А. В. Евсеева, А. А. Лавренюк // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 1 (50). – С. 61–70. – DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-61-70.

#### REFERENCES

1. Udivanov, E. S. Analysis of vertical vibration accelerations in the passenger compartment of an ambulance//Konkurs nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Volgograd, 25-29 april 2022): tez. dokl./ ed. by S.V. Kuzmin et al.; VSTU, Department of Research Coordination of Young Scientists, Society of Young Scientists. Volgograd, 2022. Pp. 110-111. (In Russian)

2. Udivanov, E. S., Lyashenko M.V., Shekhovtsov V.V., Klement'ev E.V., Iskalieva A.I. Vibrations in the structures of ambulance vehicles// Energo- i resursosberezheniye: promyshlennost' i transport. 2022. No. 2 (39). Pp. 45-50. (In Russian)

3. State Standard 33555-2015. Road vehicles. Internal noise. Permissible levels and test methods. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 19 p. (In Russian)

4. State Standard 31299-2005 (ISO 11957:1996). Noise of machines. Determination of cabin sound insulation. Laboratory and on-site tests. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 15 p. (In Russian)

5. State Standard 30691-2001 (ISO 4871:1996). Noise of machines. Declaration and control of noise performance values. Minsk, International Council for Standardization and Unification, 2001. 16 p. (In Russian)
6. *Dolotov, A. A.* Probabilistic assessment of noise levels in passenger cars: Cand. Sci. (Tech.) diss. Volgograd, VSTU, 2022. 169 p. (In Russian)
7. *Evseeva, A. V.*, Lazarenkov N.M. Experimental studies of noise levels in the passenger compartment of a special minibus // XXX Regional'naya konferentsiya molodykh uchenykh i issledovatelei Volgogradskoi oblasti (Volgograd, September 15 – November 9, 2025): conference materials / ed. by S.V. Kuzmin et al.; VSTU. Volgograd, 2025. Pp. 69-70. (In Russian)
8. *Godzhaev, Z. A.*, Shekhovtsov V.V., Potapov P.V., Klement'ev E.V., Dolotov A.A., Evseeva A.V. Experimental studies of noise levels in the passenger compartment of a special minibus//Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2025. No. 5 (373). Pp. 229-237. DOI: 10.33979/2073-7408-2025-373-5-229-237. (In Russian)
9. SN 2.2.4/2.1.8.562-96. Noise at workplaces, in premises of residential, public buildings
10. *Evseeva, A. V.* Structural measures to improve vibration protection of ambulance minibus passenger compartments. XXIX Regional'naya konferentsiya molodykh uchenykh i issledovatelei Volgogradskoi oblasti (Volgograd, September 16 – November 15, 2024): conference materials/ ed. by S.V. Kuzmin et al.; VSTU. Volgograd, 2024. P. 59. (In Russian)
11. *Klementev, E. V.*, Shekhovtsov V.V., Potapov P.V., Sokolov-Dobrev N.S., Udivanov E.S., Evseeva A.V., Lazarenkov N.M. Improvement of body-to-frame attachment device for ambulance vehicles // Energo- i resursosberezheniye: promyshlennost' i transport. 2025. No. 1 (50). Pp. 71-77. DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-71-77. (In Russian)
12. *Godzhaev, Z. A.*, Shekhovtsov V.V., Potapov P.V., Klement'ev E.V., Dolotov A.A., Evseeva A.V. New technical solutions for body-to-frame attachment device of ambulance minibuses. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2025. No. 4 (372). Pp. 39-46. DOI: 10.33979/2073-7408-2025-372-4-39-46. (In Russian)
13. *Shekhovtsov, V. V.*, Lyashenko M.V., Potapov P.V., Klementev E.V., Evseeva A.V., Udivanov E.S., Iskaliev A.I. Ru Patent Utility Model No. 231722, IPC G01M 13/02 Vibration-isolating body-to-frame attachment for vehicle. VSTU. 2025. (In Russian)
14. *Shekhovtsov, V. V.*, Lyashenko M.V., Potapov P.V., Klement'ev E.V., Evseeva A.V., Udivanov E.S., Iskalieva A.I. Ru Patent Utility Model No. 231736, IPC G01M 13/02 Vibration-isolating body-to-frame attachment for vehicle. VSTU. 2025. (In Russian)
15. *Godzhaev, Z. A.*, Shekhovtsov V.V., Sokolov-Dobrev N.S., Potapov P.V., Klementev E.V., Dolotov A.A., Evseeva A.V. Design studies to select parameters of vibration isolators for ambulance minibus passenger compartment[Fundamental and applied problems of engineering and technology]. 2025. No. 4 (372). Pp. 30-38. DOI: 10.33979/2073-7408-2025-372-4-30-38. (In Russian)
16. *Klementev, E. V.*, Shekhovtsov V.V., Potapov P.V., Sokolov-Dobrev N.S., Udivanov E.S., Evseeva A.V., Lavrenyuk A.A. Development of dynamic and mathematical models of an ambulance minibus for analysis of passenger compartment vibration protection system characteristics. Energo- i resursosberezheniye: promyshlennost' i transport. 2025. No. 1 (50). Pp. 61-70. DOI: 10.35211/2500-0586-2025-1-50-61-70. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 11.02.2026, доработана 12.02.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 11.02.2026, revised 12.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 656.1, 504.05

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-92-98

Научная статья  
Original article

**С. В. Ганзин, М. В. Смоляков, А. В. Малахов, Д. Д. Сильченков**

### ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВЕЛОСИПЕДОВ И СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ГОРОДОВ

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Сергей Валерьевич Ганзин, ganzin\_fat@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена проблемам безопасности при организации движения велосипедов и средств индивидуальной мобильности (СИМ) на улично-дорожной сети городов. Исследуется влияние СИМ, в частности электросамокатов, на безопасность движения и экологическую обстановку городов. Рассмотрены возможные методы обеспечения безопасности дорожного движения с участием велосипедистов и СИМ. На примере Центрального района г. Волгограда предложен проект нового веломаршрута, отвечающий требованиям безопасности дорожного движения. Определены основные преимущества использования СИМ для повышения мобильности населения и энергосбережения.

**Ключевые слова:** безопасность движения, организация движения, электросамокат, велосипед, мобильность, энергосбережение, автомобильный транспорт

**Для цитирования:** Ганзин С. В., Смоляков М. В., Малахов А. В., Сильченков Д. Д. Пути повышения безопасности движения велосипедов и средств индивидуальной мобильности на улично-дорожной сети городов. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 92–98. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-92-98.

**Информация об авторах:****Сергей Валерьевич Ганзин** – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры АП ВолгГТУ

e-mail: ganzin\_fat@mail.ru

**Максим Витальевич Смоляков** – студент АТ-2н ВолгГТУ

e-mail: smolyakov.maksim16@gmail.com

**Артем Валерьевич Малахов** – студент АТ-2н ВолгГТУ

e-mail: awmalakhov@mail.ru

**Дмитрий Дмитриевич Сильченков** – канд. техн. наук, доцент кафедры АП ВолгГТУ

e-mail: xdimanx.vstu@mail.ru

**Вклад авторов:****С. В. Ганзин** – разработка общей концепции исследования, редактирование статьи.**М. В. Смоляков** – разработка идеи и проектирование методологии, написание статьи.**А. В. Малахов** – анализ данных, написание статьи.**Д. Д. Сильченков** – интерпретация результатов, оформление материалов.*S. V. Ganzin, M. V. Smolyakov, A. V. Malakhov, D. D. Silchenkov***WAYS TO IMPROVE THE SAFETY OF BICYCLES AND PERSONAL MOBILITY VEHICLES ON THE CITY ROAD NETWORK****Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Sergey V. Ganzin, ganzin\_fat@mail.ru

**Abstract.** This article examines traffic safety issues related to the organization of bicycle and personal mobility devices (PMD) traffic on urban road networks. The impact of PMDs, particularly electric scooters, on traffic safety and the environmental situation in cities is examined. Potential methods for ensuring road safety involving cyclists and PMDs are considered. Using the Central District of Volgograd as an example, a design for a new bicycle route that meets road safety requirements is proposed. The key advantages of using PMDs for improving public mobility and energy conservation are identified.

**Keywords:** traffic safety, traffic management, electric scooter, bicycle, mobility, energy saving, automobile transport

**For citation:** Ganzin S. V., Smolyakov M. V., Malakhov A. V., Silchenkov D. D. Ways to improve the safety of bicycles and personal mobility vehicles on the city road network. *Energо- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 1(54): 92–98. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-92-98.

**Information about the authors:****Sergey V. Ganzin** – PhD in Technical, Associate Professor of the AT Department VSTU

e-mail: ganzin\_fat@mail.ru

**Maxim. V. Smolyakov** – student of AT-2n VSTU

e-mail: smolyakov.maksim16@gmail.com

**Artem V. Malakhov** – student of AT-2n VSTU

e-mail: awmalakhov@mail.ru

**Dmitry D. Silchenkov** – PhD in Technical, Associate Professor of the AT Department VSTU

e-mail: xdimanx.vstu@mail.ru

**Contribution of the authors:****Sergey V. Ganzin** – final approval of the version for publication.**Maxim. V. Smolyakov** – idea development and methodology design, writing the article.**Artem V. Malakhov** – data analysis, writing the article.**Dmitry D. Silchenkov** – result interpretation, material preparation.**Введение**

В связи с увеличением количества автомобилей и других видов городского транспорта, использующих невозобновляемые источники энергии, возникают такие проблемы, как предельная загрузка городской дорожной сети, загрязнение окружающей среды и ухудшение безопасности движения, негативное воздействие шума на людей. Для решения этих проблем требуется развитие других видов транспорта, в том числе велосипедного, а также средств индивидуальной мобильности (СИМ).

Безопасность передвижения на велосипедах и СИМ является одной из главных проблем,

препятствующих их развитию в российских городах. Но многие страны уже прошли через это и выработали методы повышения безопасности движения, которые в основном направлены на координацию организации движения всех видов транспортных средств с движением велосипедов, СИМ и пешеходов.

По данным НЦ БДД МВД РФ [1] в 2024 году в России зафиксировано 4426 (+42,8 %) ДТП с участием СИМ, в результате которых погибли 54 (+25,6 %) человека, в том числе 6 детей (лица в возрасте до 16 лет). Ранения получили 4 591 (+44,5 %) человек, в числе которых 1 165 детей (рис. 1).

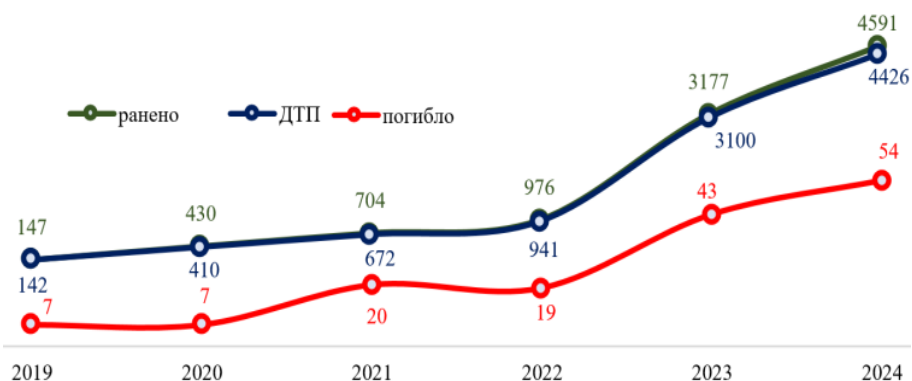


Рис. 1. Динамика основных показателей аварийности с участием СИМ

Из 54 погибших в ДТП с участием СИМ 51 (94,4 %) передвигались на СИМ (в т. ч. один пассажир). Двое погибших являлись пешеходами, на которых совершили наезд пользователи СИМ. Оба наезда на пешеходов произошли на тротуаре.

Кроме этого, зафиксировано 5249 ДТП с участием велосипедистов (погибло 295 человек) и 1254 ДТП с велосипедами с электродвигателем. При этом половина всех этих ДТП происходит на пересечениях проезжих частей и по вине велосипедистов. Таким образом, за 2024 год всего произошло 10929 ДТП с участием велосипедистов и СИМ, что составляет больше 8 % от всех ДТП в России.

Поэтому, учитывая актуальность развития данных способов передвижения, целью работы стало повышение безопасности велосипедистов и пользователей средств индивидуальной мобильности за счет применения передовых схем организации дорожного движения.

### Методика проведения исследований

Как было выявлено, наиболее опасным участком при передвижении велосипедистов и пользователей СИМ являются пересечения автомобильных дорог. Там где есть велодорожки, их часто располагают по краю проезжей части на перегонах между перекрестками, предполагая, что на каждом пересечении велосипедист должен спешиваться и переходить улицу по зебре как пешеход, так как при продолжении движения по проезжей части на перекрестке велосипедист создает конфликт с автомобилями, поворачивающими направо. Особенно часто это встречается в российских городах. Конечно, такое решение очень сильно снижает привлекательность и эффективность использования велосипеда и СИМ как альтернативных видов транспорта для передвижения по городу.

Удачное решение этой проблемы можно рассмотреть на примере регулируемых перекре-

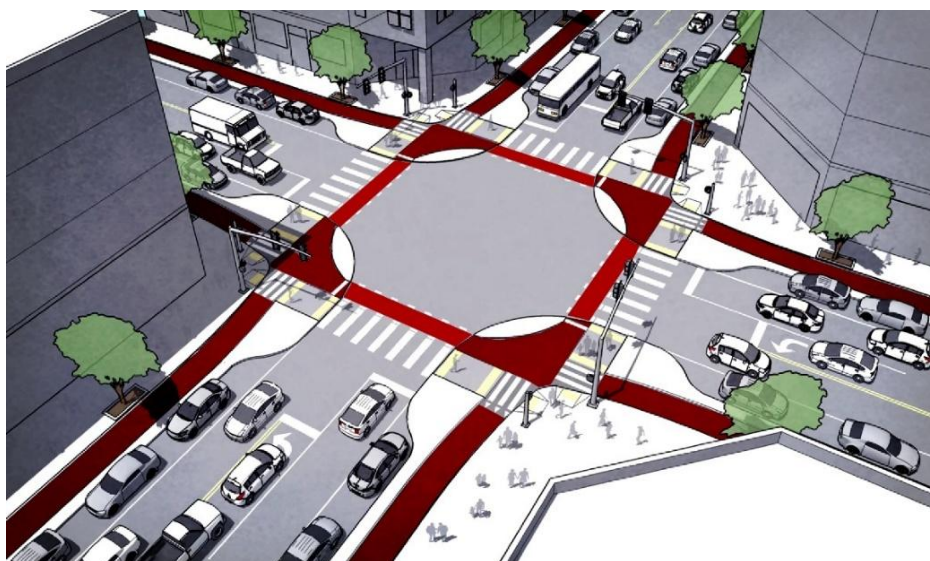


Рис. 2. Пример голландской схемы организации движения на перекрестке

стков в Нидерландах [2]. Основные принципы, которые там применяются: физическое разделение автомобильных, велосипедных и пешеходных потоков, отнесенные стоп-линии для велосипедистов, островки безопасности. На рис. 2 представлен пример организации движения на перекрестке. Обособленные велодорожки выделены красным цветом. Белым обозначены тротуары и островки безопасности. Такая планировка обладает тройным преимуществом: создается безопасное место для автомобильного трафика, для велосипедистов и для пешеходов.

Важным вопросом при организации движения велосипедистов и СИМ является отделение их от транспортного потока, так как велодорожки иногда проходят по оживленным магистралям, что нарушает ПДД и не обеспечивает защиту от несанкционированного въезда транспортных средств на них [3]. Этого можно добиться несколькими средствами, например, с помощью делинаторов. Другим способом защиты является отделение велополосы от проезжей части припаркованными автомобилями (рис. 2).

Данный метод не является техническим средством организации движения, однако припаркованные автомобили обеспечивают дополнительный уровень защиты и комфорта для велосипедистов.

#### **Проектирование велосипедной инфраструктуры в г. Волгограде**

Рассмотрим обеспечение безопасности велосипедистов и СИМ на пересечениях в г. Волгограде. Веломаршрутная сеть города состоит из 11 разрозненных маршрутов. Многие маршруты проложены без учета безопасности дорожного движения, в частности, один из них проходит по проезжей части проспекта имени Ленина, который является магистральной улицей общегородского значения с высокой интенсивностью [3]. Транспортный поток движется со скоростью свыше 50 км/ч.

Движение по велополосе в таких условиях является небезопасным. Одной из самых главных проблем данного маршрута является непродуманная организация проезда велосипедистов в зоне остановок общественного транспорта, велополоса просто прерывается перед каждой из них. Вследствие чего, большая часть велосипедистов и пользователей СИМ используют для передвижения тротуары, создавая небезопасные условия для пешеходов. Есть проблемы и с ор-

ганизацией движения на пересечениях автомобильных дорог.

Таким образом, при планировании веломаршрутной сети и/или маршрутов СИМ необходимо учитывать как вопросы безопасности, так и удобство использования [4; 5]. Учитывая эти принципы, необходимо переместить велодорожку с проспекта Ленина на параллельную ей улицу Советская. Для обеспечения безопасности велосипедистов, многочисленных пешеходов предлагается ограничить на улице Советская скорость движения автомобилей в 40 км/ч, что является обычной практикой для центральной части крупных городов мира. Велополосы будут располагаться по краям проезжей части. Протяженность маршрута в одном направлении составит 2,41 км.

При организации движения велосипедистов и пользователей СИМ на этой улице предлагается использовать на перекрестках приподнятые островки безопасности, светофоры Т9 и отнесенные велосипедные стоп-линии, для обеспечения хорошей видимости велосипедистов водителями других транспортных средств (рис. 3). При этом, если водителю велосипеда или СИМ необходимо повернуть направо, то он может совершить этот маневр, не дожидаясь разрешающего сигнала светофора. Необходимо только пропустить переходящих дорогу пешеходов. Поворот налево для велосипедистов организуется условно по круговой траектории – сначала велосипедист проедет через перекресток прямо вместе с транспортным потоком, а затем повернет налево вдоль пешеходного перехода по велополосе с учетом разрешающих сигналов светофора. Таким образом, обеспечивается безопасность левоповоротного маневра для велосипедистов и пользователей СИМ.

Также дополнительным средством безопасности является выделение велополос определенным цветом для привлечения внимания других участников движения. На перегонах рекомендуется установить делинаторы, разделяющие транспортный поток и велосипедный. Это физически устраним возможность парковок на велополосе и движение автомобилей по ней. Новый маршрут будет связан с уже имеющимися на набережной для создания целостной сети велодвижения. Организация системы велопарковок возле крупных точек притяжения дополнительно повысит привлекательность передвижения на велосипедах.



Рис. 3. Предлагаемая схема дислокации технических средств ОДД на пересечении улиц Советской и Комсомольской

На перегонах по всей длине улицы было расположено большое количество карманов для парковки по краю проезжей части (ПЧ) вдоль тротуара. На предложенной схеме велополосы проходят по краю ПЧ, отодвинув автомобильную парковку от бордюра. Тем самым создается физическая преграда, обеспечивающая безопасность велосипедистов и пользователей СИМ. Для исключения столкновения движущихся велосипедистов с открывающимися дверями припаркованных автомобилей была предусмотрена буферная полоса шириной 1 м, обозначенная разметкой 1.16.1. Велополосу следует вести прямо, не меняя траектории, чтобы избежать частых резких изменений траектории движения велосипедистов. Велополосы могут отделяться от автомобильных полос как сплошной, так и прерывистой линией разметки.

На небольших улицах, пересекающих улицу Советскую, зачастую недостаточная ширина ПЧ, чтобы сохранить две полосы движения и при этом организовать велополосы.

В таких случаях движение велосипедистов осуществляется по проезжей части согласно ПДД и велополосы отдельно не выделяются, так как на таких улицах малоинтенсивное

движение и безопасность велосипедистов обеспечена.

#### Оценка предлагаемых решений

Для количественной оценки безопасности и качества проектируемой велоинфраструктуры по улице Советской предлагается использовать методику, описанную в «Стандартах дизайна велоинфраструктуры в Лондоне» [6]. В данной методике используется показатель «Велосипедный уровень обслуживания» (англ. CLoS), который был разработан с целью установления количественной оценки велоинфраструктуры. Наивысшее количество баллов, которое может набрать веломаршрут, составляет 100 баллов. На рис. 4 представлены баллы, которые набрали существующие веломаршруты и проектируемый по улице Советской.

Веломаршрут по проспекту им. Ленина согласно методики относится к категории низкокачественных. Веломаршрут вдоль верхней террасы набережной имеет среднее качество, подходит для «среднестатистических» велосипедистов. Но имеются очень большие задержки из-за отсутствия обособленности велоинфраструктуры от пешеходных потоков.

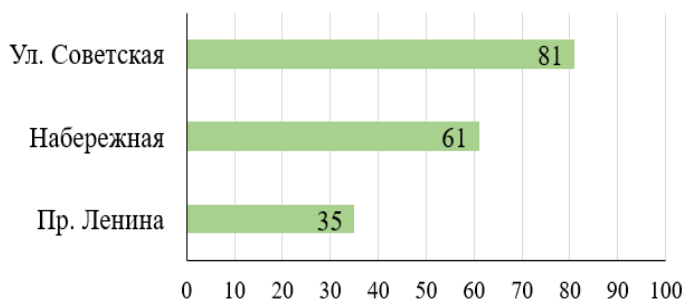


Рис. 4. Качество веломаршрутов по стандарту CLoS

Проектируемый веломаршрут значительно экономит время поездки по сравнению с пешим передвижением и с общественным транспортом, а время движения по сравнению с автомобилями практически одинаково. Согласно классификации маршрут подходит для велосипедистов всех возрастов и квалификации.

#### Заключение

Увеличение количества электросамокатов, велосипедов обеспечивает не только уменьшение загрязнения окружающей среды, но и снижение транспортных задержек, повышение мобильности населения. Однако это приводит и к негативным результатам, вызванных неупорядоченностью организации движения на СИМ и велосипедах. Повышается количество ДТП и пострадавших в них.

Одним из направлений обеспечения безопасности движения на СИМ и велосипедах является ограничение скоростного режима. Согласно ПДД (п. 24.6) скорость передвижения на электросамокатах не должна превышать 25 км/ч [7], а с помощью специальных устройств на арендованных СИМ принудительно ограничивается скорость или даже запрещается движение, например, в парковых зонах. Чтобы отслеживать нарушителей ПДД предлагается устанавливать на самокатах таблички с номерами. Такие номера уже появились на московских самокатах, которые сдаются в аренду.

Однако кардинальным решением повышения безопасности движения является отделение велосипедов и СИМ не только от автомобильного транспорта, но и от пешеходных потоков. На примере маршрута по улице Советской показаны возможные варианты организации движения велосипедистов и СИМ, который не только разделит потоки и обеспечит безопасность движения, но и увеличит скорость передвижения. Тем самым, возьмет на себя транзитную функцию в Центральном районе и повысит привлекательность использования велосипедов и СИМ.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Митрошин, Д. В. Влияние средств индивидуальной мобильности на состояние дорожно-транспортной аварийности в Российской Федерации в 2024 году / Д. В. Митрошин, К. С. Баканов, П. В. Ляхов, Е. А. Царегородцева, А. А. Гавриленко // Безопасность дорожного движения. – 2025. – № 1 (36). – С. 14–19.
2. Junction design in the Netherlands // Bicycle Dutch. – URL: <https://bicycledutch.wordpress.com/2014/02/23/junction-design-in-the-netherlands/> (дата обращения: 28.05.2024).
3. Ганзин, С. В. Проблемы внедрения электросамокатов для повышения индивидуальной мобильности и энергосбережения / С. В. Ганзин, А. А. Пантелеева, Д. Д. Сильченков // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2024. – № 3 (48). – С. 44–48. – DOI: 10.35211/2500-0586-2024-3-48-44-48.
4. Цокур А. В. Принципы поэтапного внедрения велосипедной инфраструктуры в городскую среду / А. В. Цокур, Е. В. Денисенко // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 4 (42). – С. 117–128.
5. Дирк Д. Велотранспортная инфраструктура. Принципы и практика проектирования / Д. Дирк – М.: Инфра, 2016. – 272 с.
6. The London Cycling Design Standards (LCDS) // Transport for London, 2014. – URL: [https://bicycleinfrastructuremanuals.com/manuals1/London%20Cycling%20Design%20Standards%202016\\_UK%20London.pdf](https://bicycleinfrastructuremanuals.com/manuals1/London%20Cycling%20Design%20Standards%202016_UK%20London.pdf) (дата обращения: 20.01.2025).
7. О правилах дорожного движения : постановление Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090 (ред. от 19.04.2024). – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/) (дата обращения: 28.01.2026).

#### REFERENCES

1. Mitroshin, D. V. The impact of means of individual mobility on the state of road transport accidents in the Russian Federation in 2024/D. V. Mitroshin, K. S. Bakanov, P. V. Lyakhov, E. A. Tsaregorodtseva, A. A. Gavrilenko//Road safety. – 2025. – № 1 (36). – S. 14-19.
2. Junction design in the Netherlands // Bicycle Dutch. – URL: <https://bicycledutch.wordpress.com/2014/02/23/junction-design-in-the-netherlands/> (accessed on: 28.05.2024).
3. Ganzin, S. V. Problems of introducing electric scooters to increase individual mobility and energy saving/S.V. Ganzin, A.A. Panteleeva, D.D. Silchenkov//Energy and resource saving: industry and transport. - 2024. - № 3 (48). - 44-48. - DOI: 10.35211/2500-0586-2024-3-48-44-48.

4. *Tsokur, A. V.* Principles of phased implementation of bicycle infrastructure in the urban environment/A.V. Tsokur, E.V. Denisenko//Izvestia of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. – 2017. – №. 4 (42). - S. 117-128.

5. *Dirk, D.* Cycling infrastructure. Principles and practice of design/D. Dirk - M.: Infra, 2016. - 272 p.

6. The London Cycling Design Standards (LCDS) // Transport for London, 2014. – URL: [https://bicycleinfrastructuremanuals.com/manuals1/London%20Cycling%20Design%20Standards%202016\\_UK%20London.pdf](https://bicycleinfrastructuremanuals.com/manuals1/London%20Cycling%20Design%20Standards%202016_UK%20London.pdf) (accessed on: 20.01.2025).

7. On the rules of the road: the post of the Government of the Russian Federation of 23.10.1993 No. 1090 (ed. 19.04.2024). - URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_2709/824c911000b3626674abf3ad6e38a6f04b8a7428/) (access date: 28.01.2026).

Статья поступила в редакцию 20.01.2026, доработана 05.02.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 20.01.2026, revised 05.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 631.351

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-98-106

Научная статья

Original article

*А. Ю. Лавренюк<sup>1</sup>, П. В. Потапов<sup>1</sup>, В. В. Шеховцов<sup>1</sup>  
В. В. Косенко<sup>1</sup>, С. А. Коряков<sup>2</sup>, Е. А. Сабинин<sup>2</sup>*

### СРАВНИТЕЛЬНАЯ РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВУ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА НА ОДИНАРНЫХ И СДВОЕННЫХ КОЛЕСАХ

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Комбайновый завод «Ростсельмаш»,  
Ростов-на-Дону, Россия

✉ Виктор Викторович Шеховцов, shehovtsov@vstu.ru

**Аннотация.** В статье проанализированы основные методики расчетного определения максимальных давлений колес трактора на почву – в соответствии с ГОСТ 58656-2019, методики М. И. Ляско, Pillai & Fielding и В. Ю. Ревенко. В соответствии с каждой из методик выполнены расчетные исследования значений максимальных давлений на почву колес перспективного трактора Ростсельмаша с комплектациями как на одинарных, так и на сдвоенных колесах. Представлен анализ результатов расчетных исследований, который показал, что в ряде случаев полученные по этим методикам значения максимальных давлений колес трактора на почву отличаются более чем в 2 раза. Так как из рассмотренных экспериментально подтверждена только методика В. Ю. Ревенко, выполнение на ее основе расчетных исследований признано считать предпочтительным. Результаты расчетных исследований показали, что из рассмотренных вариантов расчета по методике В. Ю. Ревенко нормативным значениям максимальных давлений колес на почву (120 кПа) из ГОСТ соответствуют только варианты комплектации ходовой системы трактора со сдвоенной ошиновкой. Максимальные давления при вариантах комплектации с одинарной ошиновкой превышают нормативные на 10–60 %. Таким образом, при выполнении сельхозработ необходимо использовать трактор со сдвоенной ошиновкой колес.

**Ключевые слова:** колесный трактор, одинарные колеса, сдвоенные колеса, максимальное давление на почву, расчетные исследования

**Для цитирования:** Лавренюк А. Ю., Потапов П. В., Шеховцов В. В., Косенко В. В., Коряков С. А., Сабинин Е. А. Сравнительная расчетная оценка воздействия на почву колесного трактора на одинарных и сдвоенных колесах. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 1(54): 98–106. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-98-106.

#### Информация об авторах:

**Антон Юрьевич Лавренюк** – аспирант кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0002-3825-1393>

e-mail: lua.ru@yandex.ru

**Павел Викторович Потапов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0001-6645-6033>;

e-mail: paulflinx@gmail.com

**Виктор Викторович Шеховцов** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-5207-8972>

e-mail: shehovtsov@vstu.ru

**Вячеслав Владимирович Косенко** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ  
https://orcid.org/0000-0002-3996-6414  
e-mail: kosenko46@gmail.com  
**Семен Андреевич Коряков** – начальник КБ ходовых систем ООО «Комбайновый завод «Ростсельмаш»  
e-mail: koryakovSA@oaorsm.ru  
**Евгений Александрович Сабинин** – инженер-конструктор ООО «Комбайновый завод «Ростсельмаш»  
e-mail: 058676@oaorsm.ru

**Вклад авторов:**

**А. Ю. Лавренюк** – проведение исследования, написание текста статьи.  
**П. В. Потапов** – проверка методик, анализ и оценка результатов.  
**В. В. Шеховцов** – написание текста статьи.  
**В. В. Косенко** – анализ и оценка результатов.  
**С. А. Коряков** – подбор исходных данных, написание текста статьи.  
**Е. А. Сабинин** – подбор исходных данных, проведение исследования.

*A. Yu. Lavrenyuk<sup>1</sup>, P. V. Potapov<sup>1</sup>, V. V. Shekhovtsov<sup>1</sup>  
V. V. Kosenko<sup>1</sup>, S. A. Koryakov<sup>2</sup>, E. A. Sabinin<sup>2</sup>*

**COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE SOIL IMPACT  
OF A WHEEL TRACTOR ON SINGLE AND DOUBLE WHEELS**

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia  
<sup>2</sup>Rostselmash Combine Plant Limited Liability Company, Rostov-na-Donu, Russia

✉ Viktor V. Shehovtsov, shehovtsov@vstu.ru

**Abstract.** This paper presents analysis of main methods for calculating of maximal pressures of tractor wheels on soil – in accordance with GOST 58656-2019, methods of Lyasko M.I., Pillai & Fielding and Revenko V.Yu. Calculations of maximal pressures of wheels on soil for perspective Rostselmash tractor in versions with single and double wheels were performed on the base of mentioned methods. Presented results analysis shows that in some cases values of maximal tractor wheels pressure on soil are different more than 2 times. Only the method proposed by Revenko V. Yu. has experimental confirmation thus it should be used for computational research. Research results performed on the base of the Revenko method show that only variants of tractor with double wheels satisfy regulatory values of maximal pressure of tractor wheels on soil (120 kPa) from GOST. Maximal values for tractor with single wheels exceed limit values by 10-60 %. Thus, tractor with double wheels has to be used in agricultural operations.

**Keywords:** wheeled tractor, single wheels, double wheels, maximal pressure on soil, computational research

**For citation:** Lavrenyuk A. Yu., Potapov P. V., Shekhovtsov V. V., Kosenko V. V., Koryakov S. A., Sabinin E. A. Comparative assessment of the soil impact of a wheel tractor on single and double wheels. *Energio-i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 1(54): 98–106. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-98-106.

**Information about the authors:**

**Anton Yu. Lavrenyuk** – postgraduate student at the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU

e-mail: lua.ru@yandex.ru

**Pavel V. Potapov** – Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU

e-mail: paulflinx@gmail.com

**Viktor V. Shehovtsov** – Professor, Dr. Sci. (Tech), Professor of the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU

e-mail: shehovtsov@vstu.ru

**Vyacheslav V. Kosenko** – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Technical Operation and Service of Automobiles Department VSTU

e-mail: kosenko46@gmail.com

**Semyon A. Koryakov** – Head of the Design Bureau of chassis at Rostselmash Combine Plant Limited Liability Company VSTU

e-mail: koryakovSA@oaorsm.ru

**Evgenii A. Sabinin** – Design engineer at Rostselmash Combine Plant Limited Liability Company VSTU  
e-mail: 058676@oaorsm.ru

**Contribution of the authors:**

**Anton Yu. Lavrenyuk** – performing research, writing the article.

**Pavel V. Potapov** – methods verification, results analysis and verification.

**Viktor V. Shekhovtsov** – writing the article, final approval of the version for publication.

**Vyacheslav V. Kosenko** – results analysis and verification.

**Semyon A. Koryakov** – searching of source data, writing the article.

**Evgenii A. Sabinin** – searching of source data.

### Введение

Максимальное давление движителей сельскохозяйственного трактора на почву ( $q_{\max}$ ) является ключевым показателем, определяющим его опорно-временные характеристики проходимости и агроэкологические свойства. При увеличении давления происходит углубление колеи, увеличение сопротивления качению и, как следствие, снижение тягового КПД. Уплотнение почвы трактором приводит также к ухудшению условий роста растений и снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

ГОСТом 26955–2019 [1] для сельскохозяйственных колесных тракторов в штатной комплектации колесных тракторов на одинарных колесах и агрегируемых с ними машин предельно установлены допустимые нормы давления движителей на почву.

В настоящее время осуществляется проектирование перспективного колесного трактора (рис. 1) с комплектациями как на одинарных, так и на сдвоенных колесах. Поэтому актуальной является оценка соответствия нормам ГОСТа давления движителей трактора на почву в той и другой комплектациях.

### Расчетная оценка давления в соответствии с ГОСТ 58656-2019

ГОСТ 58656-2019 [2] предусматривает оценку нахождения максимального давления движителей трактора на почву в соответствии с методикой, приведенной в книге М. И. Ляско «Ходовая система-почва-урожай» [3].



Рис. 1. Перспективный трактор Ростсельмаш

В соответствии с М. И. Ляско, экспериментально-расчетным методом максимальное нормальное давление определяется по формуле:

$$q_{\max} = \frac{K_2 G_k}{K_1 F_k}, \quad (1)$$

где  $K_2 = 1,5$  – коэффициент продольной неравномерности распределения давления;  $G_k$  – статическая вертикальная нагрузка на опорное основание от единичного колесного движителя, Н;  $K_1$  – коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса;  $F_k$  – контурная площадь пятна контакта протектора шины,  $\text{м}^2$ .

Статическую вертикальную нагрузку от единичного колесного движителя определяем по методике, предложенной В. В. Косенко [4]:

$$G_k = \frac{G_3}{n \cdot l} (l - l_{\text{цм}}), \quad (2)$$

где  $G_3$  – эксплуатационный вес трактора, Н;  $n$  – количество движителей на оси;  $l$  – колесная база трактора, м;  $l_{\text{цм}}$  – горизонтальное расстояние от оси движителя до центра масс, м.

Эксплуатационный вес трактора определим из выражения:

$$G_3 = m_{\text{тр}} \cdot g, \quad (3)$$

где  $m_{\text{тр}}$  – масса трактора, кг;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Горизонтальное расстояние от оси движителя до центра масс определится как

$$l_{\text{цм}} = \frac{l}{m_{\text{тр}}} m_{\text{рм}}, \quad (4)$$

где  $m_{\text{рм}}$  – масса трактора, приходящаяся на заднюю ось:

$$m_{\text{рм}} = m_{\text{тр}} \cdot K_p, \quad (5)$$

где  $K_p$  – коэффициент распределения массы трактора по осям.

Проектируемый трактор имеет максимальную массу 14 тонн, распределение массы по осям 40/60 (из этого следует, что  $K_p$  для передней оси составляет 0,4, а для задней оси – 0,6), колесная база трактора составляет 3 метра.

Полученные расчетом значения нагрузок на передние и задние колеса приведены в табл. 1.

Контурную площадь пятна контакта шины с опорной поверхностью (рис. 2) рассчитываем по формуле:

$$S_{\text{нт}} = \frac{\pi \cdot a_k \cdot b_k}{4}, \quad (6)$$

где  $a_k$  – длина отпечатка шины на почве, м;  $b_k$  – ширина отпечатка шины на почве, м.

Длину отпечатка шины на почве определим из выражения:

$$a_k = C_3 \cdot \sqrt{f \cdot (D - f)}, \quad (7)$$

где  $C_3$  – поправочный коэффициент для тракторных шин;  $f$  – деформация (статический прогиб) шины под нагрузкой, м;  $D$  – наружный диаметр шины в свободном состоянии, м.

Таблица 1

Значения нагрузок на передние и задние колеса

Двигатель	Масса, приходящая на ось, кг	Горизонтальное расстояние от оси двигателя до центра масс, м	Количество двигателей на оси	Статическая вертикальная нагрузка единичного колесного двигателя, Н
Передний (одинарная ошиновка)	5600	1,8	2	27468
Передний (сдвоенная ошиновка)	5600	1,8	4	13734
Задний (одинарная ошиновка)	8400	1,2	2	41202
Передний (сдвоенная ошиновка)	8400	1,2	4	20601

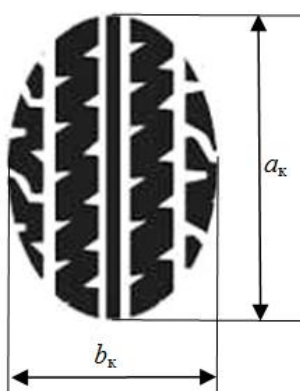


Рис. 2. Схема пятна контакта шины с опорной поверхностью

Ширину отпечатка шины на почве определим из выражения:

$$b_{кр} = 2 \cdot \sqrt{f \cdot (R_{пр} - f)}, \quad (8)$$

где  $R_{пр}$  – приведенный радиус поперечного сечения (профиля) шины, м.

Поправочный коэффициент для тракторных шин:

$$C_3 = \frac{20,5}{11,9 - \left[ \frac{D}{B} - \frac{|n_{ш} - 9|}{2} - 3 \right]}, \quad (9)$$

где  $B$  – ширина профиля шины, м;  $n_{ш}$  – норма слоистости шины (в расчетах принималась  $n_{ш} = 8$  [2, 4]).

Статический прогиб шины (формула Хейдекеля):

$$f = \frac{G_k}{C_{ш}}, \quad (10)$$

где  $C_{ш}$  – жесткость шины, Н/м.

Приведенный радиус поперечного сечения (профиля) шины:

$$R_{пр} = \frac{B + H}{2,5}, \quad (11)$$

где  $H$  – высота профиля шины, м.

Жесткость шины:

$$C_{ш} = \pi \cdot p_w \cdot \sqrt{2 \cdot R_{пр} \cdot D}, \quad (12)$$

где  $p_w$  – давление воздуха в шине, Па.

Проектируемый трактор предполагается оснащать в базовой комплектации передними шинами 540/65R30 и задними 650/65R42. На заднюю ось допускается также установка сдвоенных колес. Для работ в междурядье предполагается опция с установкой передних шин 380/80R38 и задних шин 480/80R50. Заднюю и переднюю оси допускается оснащать сдвоенными колесами.

Максимальная транспортная скорость трактора ограничена 40 км/ч, а технологическая скорость – 15 км/ч. Данные по параметрам шин взяты из каталога Continental [5] и представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры шин

Шина	Наружный диаметр шины в свободном состоянии, мм	Ширина профиля шины, мм	Высота профиля шины, мм	Давление воздуха в шине (при максимальной нагрузке и скорости 15 км/ч), Па	Давление воздуха в шине (при минимальной нагрузке и скорости 15 км/ч), Па
540/65R30	1464	540	351	240000	120000
650/65R42	1925	650	423	320000	80000
380/80 R 38	1575	380	304	240000	120000
480/80 R 50	2060	480	384	240000	120000

**Поправки в методику,  
предложенные М. И. Ляско**

В 1994 М. И. Ляско [6] предложил изменить формулу нахождения поправочного коэффициента (9) для тракторных шин:

$$C_3 = \frac{23}{11,9 + \left| \frac{D}{B} - 3,5 \right|}. \quad (13)$$

При замене в методике формулы (9) на формулу (13) получены значения давлений на почву передних и задних колес, приведенные в табл. 3.

**Поправки в методику  
в соответствии с Pillai & Fielding**

В соответствии с Pillai & Fielding [7] предполагается использование другой формулы нахождения контурной площади пятна контакта:

$$S_{\text{нт}} = 1,85 \cdot B \cdot f^{2/3} \cdot R^{1/3}, \quad (14)$$

где  $R$  – свободный радиус шины, м:

$$R = \frac{D}{2}.$$

При замене в методике формулы (6) на формулу (14) получены значения давлений на почву передних и задних колес, приведенные в табл. 3.

**Поправки в методику  
в соответствии с В. Ю. Ревенко**

Контурную площадь пятна контакта в соответствии с В. Ю. Ревенко [8] предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$S = 2 \cdot B \cdot \sqrt{f \cdot (D - f)} + 0,5 \cdot H \cdot f. \quad (15)$$

При замене в методике формулы (6) на формулу (15) получены значения давлений на почву передних и задних колес, приведенные в табл. 3.

В статье [9] Ревенко и другие авторы провели эксперимент по сравнению расчетных и измеренных значений максимальных давлений на почву. Результаты показали, что разница расхождения результатов составила 1,9–3,3 %, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов расчетных и экспериментальных исследований.

**Результаты расчетных исследований**

Таблица 3

**Максимальные давления колес на почву в соответствии с приведенными методиками**

Шина	ГОСТ 58656-2019, кПа	Измененная методика М. И. Ляско, кПа	Методика Pillai & Fielding, кПа	Методика В. Ю. Ревенко, кПа	Норма по ГОСТ 26955–2019, кПа
540/65R30 (при максимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	160	320	340	135	120
650/65R42 (при максимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	252	514	490	178	120
650/65R42 (при максимальной нагрузке, двоянная ошиновка)	118	242	235	86	120
540/65R30 (при минимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	95	189	234	102	120
650/65R42 (при максимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	64	130	184	86	120
650/65R42 (при максимальной нагрузке, двоянная ошиновка)	47	96	93	43	120
380/80R38 (при максимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	141	371	493	193	120
380/80R38 (при максимальной нагрузке, двоянная ошиновка)	70	186	247	96	120
480/80R50 (при максимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	125	346	462	179	120
480/80R50 (при минимальной нагрузке, двоянная ошиновка)	68	187	244	93	120
380/80R38 (при минимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	74	196	311	136	120
380/80R38 (при минимальной нагрузке, двоянная ошиновка)	26	70	120	56	120
480/80R50 (при минимальной нагрузке, одинарная ошиновка)	73	200	312	133	120
480/80R50 (при минимальной нагрузке, двоянная ошиновка)	25	70	118	54	120

**Анализ результатов  
расчетных исследований**

Согласно ГОСТ 26955-2019 в весенний период для почвы с влажностью 0,6-0,7 НВ допустимое давление движителя не должно превышать 120 кПа.

Сравнение полученных значений максимальных давлений колес на почву, полученных по методике ГОСТ 58656-2019, свидетельствует о том, что эти значения значительно занижены относительно значений, полученных по другим методикам.

Однако данная методика распространяется на диагональные шины, для которых есть норма слойности, поэтому производить расчеты по методике из ГОСТа для радиальных шин, которыми должен быть оснащен трактор, нецелесообразно – норма слойности для этих шин отсутствует как в ГОСТах (рис. 3, [10]), так

и в каталогах производителей (рис. 4, [11]).

Более высокие значения максимальных давлений получаются при выполнении расчетных исследований по методикам М. И. Ляско и Pillai & Fielding. В ряде случаев они дают очень близкие результаты, например, 96 и 93 кПа для шин 650/65R42 (при максимальной нагрузке, сдвоенная ошиновка), а в части случаев результаты отличаются более чем в 1,5 раза (см. 200 и 312 МПа для шин 480/80R50 при минимальной нагрузке, одинарная ошиновка).

Также, как и при ГОСТовской методике, существенно более низкие значения максимальных давлений получаются при расчетах по методике В. Ю. Ревенко. Так как точность этой методики подтверждена результатами экспериментальных исследований, выполнение с ее использованием расчетных исследований может быть предпочтительным.

**Приложение А  
(обязательное)**

**Обозначения, основные параметры и размеры, нормы эксплуатационных режимов шин**

Таблица А.1

ГОСТ 7463–2003

Обозначение шины	Индекс нагрузки, символ скорости	Норма слойности шины	Условное обозначение профиля обода по ГОСТ 10410	Размеры шины, мм			Обозначение камеры	Двойная толщина стенки камеры, мм, не менее	Обозначение вентиля по ГОСТ 8107	Смещение вентиля от продольной оси (справочное), мм		Максимальная допустимая нагрузка на шину и давление в шине, соответствующее этой нагрузке		Минимальное допустимое давление в шине и максимальная нагрузка, соответствующая этому давлению		Максимальная скорость, км/ч
				Наружный диаметр (пред. откл. ± 1,5 %)	Ширина профиля без нагрузки, не более	Статический радиус (пред. откл. ± 2,5 %)				Нагрузка, кг	Давление, кПа	Давление, кПа	Нагрузка, кг			
														20	185	
<b>Шины ведущих колес</b>																
<b>Диагональные шины</b>																
4.00-10	49 A6	4	3,00D	475	114	224	4.00-10	3,2	ЛК-35-16,5	20	185	220	100	115	30	
6L-12	44 A6	2	5JA	570	155	267	6-12	3,2 2,0*	ЛК-35-16,5	25	160	100	80	140	30	
9.5-32	110 A6 117 A6	6 8	W8 W7	1240	241	590	9.5-32	4,5	ТК, ГК-50	50	1065 1285	210 280	80 80	605 605	30 30	
9.5-42	116 A6	6	W8; DW8	1512	241	725	9.5-42	4,5	ТК	59	1250	210	80	710	30	
11.2-20	114 A6	8	W10	985	284	460	11.2-20	3,5	ТК, ГК-50	48	1180	210	100	765	30	
11.2-28	112 A6 118 A6	6 8	W9; W7 W10	1210	284	567	11.2-28	4,5	ТК	60	1120 1320	180 240	80 80	695 695	30 30	
13.6-20	121 A6	8	W12	1060	345	490	13.6-20	3,5	ТК	75	1450	170	80	1010	30	
14.9-30	126 A6 131 A6	6 8	W13; DW13 W12; DW12	1402	378	650	14.9-30	4,5	ТК	98	1700 1950	140 180	100 100	1375 1375	30 30	
15.5-38	128 A6 133 A6 138 A6	6 8 10	W14L; DW14L	1570	394	738	13.6-38	4,5	ТК ТК	92 96	1800 2060 2360	140 180 230	100 100 100	1450 1450 1450	30 30 30	
18.4-24	136 A6	8	DW16	1400	467	623	18.4-24 21.3-24	4,5 4,5	ТК ТК	115 120	2240	140	110	1945	30	
18.4/78-30	134 A6 139 A6 145 A6	6 8 10	DW16 DW14	1525	490	693	18.4-30	4,5	ТК	108	2120 2430 2900	110 140 180	100 100 100	2005 2005 2005	30 30 30	

Рис. 3. Параметры диагональных и радиальных шин согласно ГОСТ (см. также с. 104)

Продолжение таблицы А.1

Обозначение шины	Индекс нагрузки, символ скорости	Норма стойкости шины	Условное обозначение профиля обода по ГОСТ 10410	Размеры шины, мм			Обозначение камеры	Двойная толщина стенки камеры, мм, не менее	Обозначение вентиля по ГОСТ 8107	Смещение вентиля от продольной оси (справочное), мм	Максимальная допустимая нагрузка на шину и давление в шине, соответствующее этой нагрузке		Минимальное допустимое давление в шине и максимальная нагрузка, соответствующая этому давлению		Максимальная скорость, км/ч
				Наружный диаметр (пред. откл. ± 1,5 %)	Ширина профиля без нагрузки, не более	Статический радиус (пред. откл. ± 2,5 %)					Нагрузка, кг	Давление, кПа	Давление, кПа	Нагрузка, кг	
18.4-34	137 A6 142 A6	6 8	W16L DW16; W15L	1650	467	750	18.4-34	4,5	TK	107	2300 2650	110 140	100 100	2130 2130	30 30
18.4-38	139 A6 143 A6	6 8	W16L W15L	1750	467	800	18.4-38 16.9-38	4,5 4,5	TK TK	108 118	2430 2725	110 140	100 100	2250 2250	30 30
30.5L-32	162 A6	12	DW27	1870	775	840	30.5L-32 30.5-32	5,0 5,0	TK TK	196 200	4750	140	110	4100	30
Радиальные шины															
9.5R32	112 A8		W8 W7	1245	241	579	9.5-32	4,5	TK, GK-50	50	1120	160	60	730	40
9.5R42	118 A6		W8; DW8	1500	241	720	9.5-42	4,5	TK	59	1320	240	80	690	30
11.2R20	111 A8 120 A8		W10 W9; W7	995	284	450	11.2-20	3,5	TK, GK-50	48	1090 1400	160 240	80 80	700 700	40 40
11.2R24**	114 A8		W10 W9	1095	284	501	11.2-24	4,5	TK	60	1180	160	60	770	40
11.2R28	116 A8		W10 W9; W10H	1200	284	552	11.2-28	4,5	TK	60	1250	160	80	840	40
11.2R32	117 A8 121 A8 134 A8		W10 W9; W8	1300	284	595	9.5-32	4,5	TK, GK-50	50	1285 1450 2120	160 240 360	60 120 120	820 1000 1000	40 40 40
11.2R42	126 A6		W10 W9	1555	284	740	11.2-42 9.5-42	4,5 4,5	TK TK	59 59	1700	240	80	895	30
360/70R24**	122 A8		W11 W10; W12	1114	357	507	УК-24Я	4,5	TK	80	1500	160	60	1000	40
12.4R28	121 A8		W11; DW11 W10; W9	1250	315	578	12.4-28	4,5	TK	71	1450	160	80	970	40
13.6R20	120 A8		W12	1060	345	480	13.6-20	4,0 3,5*	TK	79	1400	160	80	1020	40

ГОСТ 7463—2003

Рис. 3. Окончание

## Технические параметры

Типоразмер, модель	Исполнение: бескамерная (б/к) камерная (к)	Индекс несущей способности и категория скорости	Максимальная скорость, км/ч	Максимальная допустимая нагрузка на шину, кгс	Внутреннее давление в шине, соответствующее максимально допустимой нагрузке, кПа	Наружный диаметр, мм	Ширина профиля*, не более, мм	Статический радиус, мм	Обозначение обода рекомендуемый / допустимый	Обозначение камеры	Обозначение вентиля	Обозначение ободной ленты	Нормативная слоистость	Масса шины, кг, не более	
7,50L-16 VOLTYRE AGRO DR-102	К	60A6 72A6	30	250 355	80	705	+21 -12	205	340±9	5,50F/ 6J	6,95-16	ЛК-35- 16,5	2	18	
		86A6 98A6		530 750	240								4		
9,00-16 VOLTYRE AGRO IR-107	К	121A8	40	1450	335	855	+19 -11	234	389±10	6,00F	9,00-16	ГК-95, К-105, ГК-115	-	10	25,7
9,5L-15SL VOLTYRE AGRO IF-127	Б/К	новинка	50	1120	300	767	250	353	7LB-15	-	-	-	8	25	
		112B													
9,5R32 VOLTYRE AGRO DN-104	К	112A8	40	1120	160	1245	+17 -18	241	579±15	W8/W7	9,5-32	ТК	-	-	52
9,5-32 VOLTYRE AGRO DN-104B	К	117A6	30	1285	280	1250	+31 -18	241	595±15	W8/W7	9,5-32	ТК	-	8	48
30,5L-32 VOLTYRE AGRO DT-118	Б/К	новинка	40	5000	183	1824	810	825	DH27/ DH27B-32, DH27H-32, DH27HB-32	-	-	-	16	320	
		164A8													

Рис. 4. Параметры шин из каталога VOLTYRE

### Выводы

1. Рассмотрены основные методики расчетного определения максимальных давлений колес трактора на почву – в соответствии с ГОСТ 58656-2019, методики М. И. Ляско, Pillai & Fielding и В. Ю. Ревенко. Так как экспериментально подтверждена только методика В. Ю. Ревенко, выполнение на ее основе расчетных исследований можно считать предпочтительным.

2. В соответствии с каждой из методик выполнены расчетные исследования значений максимальных давлений на почву перспективного трактора Ростсельмаша с комплектами как на одинарных, так и на сдвоенных колесах. Расхождение результатов, полученных по методикам М. И. Ляско, Pillai & Fielding и методике В. Ю. Ревенко в ряде случаев отличается более чем в 2 раза.

3. Из рассмотренных вариантов расчета по методике В. Ю. Ревенко нормативным ГОСТовским значениям максимальных давлений

колес на почву (120 кПа) соответствуют только варианты комплектации со сдвоенной ошиновкой. Максимальные давления при вариантах комплектации с одинарной ошиновкой превышают нормативные на 10–60 %. Таким образом, при выполнении сельхозработ необходимо использовать трактор со сдвоенной ошиновкой колес.

4. В долгосрочной перспективе целесообразно рассмотреть возможность актуализации ГОСТ 58656-2019 с целью повышения его соответствия современным требованиям и достижения более точной оценки эксплуатационных характеристик радиальных шин.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 26955-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву». – М.: «Стандартиформ», 2019. – 6 с.

2. ГОСТ 58656-2019 «Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву». – М.: «Стандартиформ», 2019. – 20 с.

3. Ксеневиц, И. П. Ходовая система – почва – урожай / И. П. Ксеневиц, В. А. Скотников, М. И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
4. Сравнительный расчет воздействия на почву (средних и максимальных давлений) гусеничного и колесного сельскохозяйственных тракторов: метод. указания к лабораторной работе по дисциплине «Теория НТТС» / сост.: В. В. Косенко, А. И. Искалиев, А. А. Пушкарев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – 12 с.
5. Agricultural Tires Technical Databook. Continental. 2023.
6. *Lyasco, M.* The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface. *Journal of Terramechanics*. 1994. V. 31(4). Pp. 239-242.
7. *Pillai, P.* Empirical equation for tire footprint area // *Rubber Chem. Tech.* 1986. V. 59(1). Pp. 155-159.
8. Уточненная методика определения площади опорной поверхности шин современной сельскохозяйственной техники / В. Ю. Ревенко, С. С. Фролов, А. Н. Ткаченко, А. Б. Иванов // *Техника и оборудование для села*. – 2021. – № 7(289). – С. 10-15. – DOI 10.33267/2072-9642-2021-7-10-15. – EDN KTXFUP.
9. *Ревенко, В. Ю.* Методика расчета давления на почву колесных тракторов / В. Ю. Ревенко, А. Н. Назаров, В. И. Скорляков // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2023. – Т. 24, № 5. – С. 868–876. – DOI 10.30766/2072-9081.2023.24.5.868-876. – EDN USTMJP.
10. ГОСТ 7463-2003 «Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия». – М.: «ИПК Издательство стандартов», 2004. – 26 с.
11. Каталог бренда VOLTYRE. 2022.
2. State Standard 58656-2019 “Agricultural mobile machinery. Methods for determining force produced by propelling agents on soil. Moscow.: “Standartinfrom”, 2019. – 6 p.
3. *Ksenevich, I. P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I.* The Running System – Soil – Crop Moscow: Agropromizdat, 1985. – 304 p.
4. Comparative Calculation of Soil Impact (Average and Maximum Pressures) of Crawler and Wheeled Agricultural Tractors: Methodological Guidelines for Laboratory Work on the Discipline «Theory of NTTS» /V.V. Kosenko, A.I. Iskalieva, A.A. Pushkarev; VSTU. – Volgograd, 2018. – 12 p.
5. Agricultural Tires Technical Databook. Continental. 2023.
6. *Lyasco, M.* The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on a rigid surface // *Journal of Terramechanics*. 1994. Vol. 31(4). Pp. 239-242.
7. *Pillai, P.* Empirical equation for tire footprint area // *Rubber Chem. Tech.* 1986. Vol. 59(1). Pp. 155-159.
8. *Revenko, V. Yu., Frolov S.S., Tkachenko A.N., Ivanov A.B.* Improved methodology for determining the area of the supporting surface of tires of modern agricultural machinery // *Machinery and equipment for rural area*. 2021. No. 7(289). Pp. 10-15. DOI: 10.33266/2072-9082-2021-7-10-15. EDN: KTXFUP.
9. *Revenko, V. Yu., Nazarov A.N., Skorlyakov V.I.* Methodology for calculating soil pressure of wheeled tractors // *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2023. Vol. 24, No. 5. Pp. 868-876. DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.5.868-876. EDN: USTMJP.
10. State Standard 7463-2003 «Pneumatic Tires for Tractors and Agricultural Machinery. Technical Specifications». – Moscow: «IPC Standards Publishing House», 2004. – 26 p.
11. VOLTYRE Brand Catalog. 2022.

## REFERENCES

1. State Standard 26955-2019 “Agricultural mobile machinery. Rates of force produced by propelling agents on soil”. Moscow.: “Standartinfrom”, 2019. – 6 p.

Статья поступила в редакцию 20.01.2026, доработана 05.02.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 20.01.2026, revised 05.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 629.33  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-106-112

Научная статья  
Original article

**Е. В. Балакина, Д. С. Сарбаев, Я. В. Короляш**  
**О ВОЗДЕЙСТВИИ ЕДИНИЧНОЙ ДОРОЖНОЙ НЕРОВНОСТИ**  
**НА ДВИЖЕНИЕ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Екатерина Викторовна Балакина, fahrgestell2011@yandex.ru

**Аннотация.** Проанализированы виды единичных дорожных искусственных и естественных неровностей. Сопоставлены их размеры с размерами шин для легковых транспортных средств. Разработана схема влияния параметров выбоины на свойства активной безопасности транспортного средства. Показано, что устойчивость движения и управляемость определяются в основном явлениями увода колес, угловых колебаний управляемых колес и явлением нарушения контакта колес с дорогой.

**Ключевые слова:** транспортное средство, активная безопасность, единичная дорожная неровность

**Для цитирования:** Балакина Е. В., Сарбаев Д. С., Короляш Я. В. О воздействии единичной дорожной неровности на движение транспортного средства. *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. 2026; 1(54): 106–112. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-106-112.

**Информация об авторах:**

**Екатерина Викторовна Балакина** – д-р техн. наук, профессор кафедры ТЭРА ВолгГТУ  
<https://orcid.org/0000-0001-5152-9340>  
Scopus ID: 6506709832  
e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru

**Дмитрий Сергеевич Сарбаев** – старший преподаватель кафедры ТЭРА ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0003-4770-039X>

ScopusID: 57205452984

e-mail: sards93@yandex.ru

**Ярослав Владимирович Короляш** – аспирант кафедры ТЭРА ВолгГТУ

e-mail: Yaroslav.korolyash@gmail.com

**Вклад авторов:**

**Е. В. Балакина** – разработка общей концепции исследования, написание статьи.

**Д. С. Сарбаев** – сбор и систематизация параметров шин разных производителей.

**Я. В. Короляш** – оформление материалов.

*E. V. Balakina, D. S. Sarbaev, Ya. V. Korolyash*

**OF THE IMPACT OF A SINGLE ROAD BUMP  
ON VEHICLE MOVEMENT**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Ekaterina V. Balakina, fahrgestell2011@yandex.ru

**Abstract.** The types of individual artificial and natural road bump are analyzed. Their sizes are compared with the sizes of tires for passenger vehicles. A scheme of the influence of bump parameters on the active safety properties of a vehicle has been developed. It is shown that the movement stability and controllability are determined mainly by the phenomena of wheel slip, angular oscillations of the steered wheels and the disruption phenomenon of the contact wheels with the road.

**Keywords:** vehicle, active safety, single road bump

**Forcitation:** Balakina E. V., Sarbaev D. S., Korolyash Ya. V. Of the impact of a single road bump on vehicle movement. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 1(54): 106–112. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-106-112

**Information about authors:**

**Ekaterina V. Balakina** – Doctor of Technical Sciences, professor of the TOaCR Department VSTU

<https://orcid.org/0000-0001-5152-9340>

Scopus ID: 6506709832

e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru

**Dmitry S. Sarbaev** – senior lecturer of the TOaCR Department VSTU

<https://orcid.org/0000-0003-4770-039X>

ScopusID: 57205452984

e-mail: sards93@yandex.ru

**Yaroslav V. Korolyash** – postgraduate student of the TOaCR Department VSTU

e-mail: Yaroslav.korolyash@gmail.com

**Contribution of the authors:**

**E. V. Balakina** – final approval of the version for publication, writing the article.

**D. S. Sarbaev** – material preparation.

**Ya. V. Korolyash** – material preparation.

Безопасность движения определяется в первую очередь активной безопасностью транспортных средств (ТС) и дорожной инфраструктурой. Свойства активной безопасности колесного ТС – устойчивость, управляемость и тормозная динамика [1–4] – тесно связаны с явлениями, происходящими в пятнах контакта деформируемых колес с твердой опорной поверхностью [5–10]. Это явления бокового увода передних и задних колес, малых (шимми) и больших (самоповорот) колебаний управляемых колес вокруг осей поворота, сцепного взаимодействия колес с дорогой и перераспределения нормальных нагрузок на колеса. Параметры этих явлений связаны [11–16] с режима-

ми силового нагружения колес при их качении [17; 18]. Под действием внешних сил, соответствующих режиму качения, колесо деформируется по разным координатам. Это приводит не только к изменению размеров пятна контакта, но и к появлению плеч реакций опорной поверхности и соответствующих возмущающих моментов. Известно, что быстрый проезд единичной неровности негативно сказывается на состоянии элементов колеса [19] и не обеспечивает надежного контакта колеса с дорогой [20]. В результате ухудшается безопасность ТС. Ситуация усугубляется при переезде неровности колесами полуприцепа, когда нарушение их контакта с опорной поверхностью

приводит к горизонтально-угловым колебаниям полуприцепа.

Единичные неровности опорной поверхности бывают естественные и искусственные.

Искусственные неровности (ИН) устраивают для обеспечения принудительного ограничения скорости движения транспортных средств (ТС)

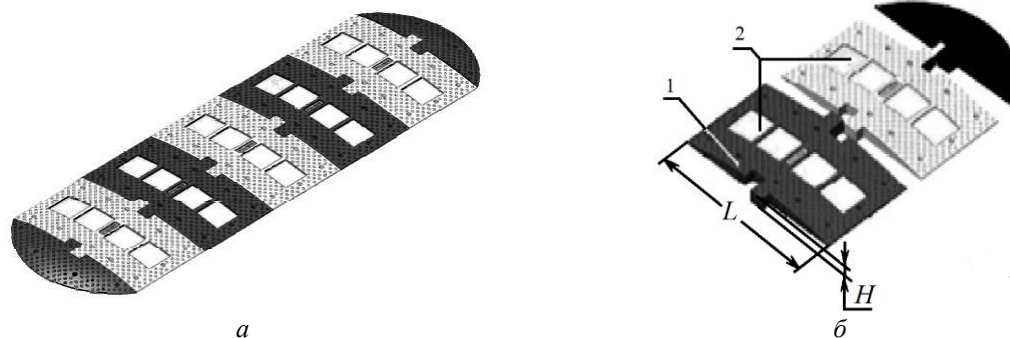


Рис. 1. Искусственная дорожная неровность:  
а – общий вид; б – основные геометрические параметры

ИН изготавливают на основе различных эластомерных материалов (полимерных, резиновых и других смесей), обеспечивающих технические требования к ИН. Конструкции типовых искусственных неровностей должны состоять из ряда однотипных геометрически совместимых основных и краевых элементов [21]. Геометрические размеры элементов типовых ИН – длину хорды  $L$  и высоту гребня  $H$  – в настоящее время принимают в зависимости от требуемого ограничения максимальной скорости движения ТС в соответствии с нормативным документом [21]. Известно, что размеры и форма неровностей опорной поверхности влияют не только на виброзащитенность (плавность хода) транспортного средства, но и на параметры его устойчивости движения. Под руководством профессора И. В. Балабина проводились работы по оптимизации параметров ИН по критерию сохранения целостности и отсутствия деформации колесного диска [19]. Другой исследователь – О. И. Балабин в настоящее время изучает влияние параметров ИН на устойчивость автомобиля [20].

Естественные дорожные неровности образуются в результате естественного износа покрытия. Они являются дорожными дефектами и могут иметь вид выступов или впадин. Они оказывают значительное влияние на режим и безопасность движения как отдельных автомобилей, так и всего потока ТС в целом. Дорожные дефекты являются одной из причин

на отдельных участках дорог с капитальным покрытием в разных климатических условиях. Их нормативные геометрические параметры [21], в зависимости от ограничения скорости движения ТС, обеспечивают вертикальные виброускорения в диапазоне 15...36g. Пример искусственной неровности показан на рис. 1.

ДТП, провоцируя ошибки водителей [22]. Большая роль в обеспечении безопасности движения принадлежит основным технико-эксплуатационным показателям автомобильных дорог. К числу таких показателей относится ровность и шероховатость дорожного покрытия. ГОСТ Р 50597-2017 [23] регламентирует перечень дефектов проезжей части дорожного покрытия. Согласно приведенной в этом документе классификации, выделяют следующие виды дефектов покрытия проезжей части: выбоина, пролом, просадка, сдвиг, волна, гребенки, колея, необработанные места выпотевания вяжущего.

Эти дефекты могут иметь разные геометрические размеры и форму, сопоставимые с размерами колес ТС. Поэтому требует рассмотрения вопрос взаимодействия единичных дорожных неровностей и автомобильных колес. ГОСТ Р 50597-2017 «Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения» [23], определяет, в том числе, и допустимые размеры единичных выбоин на дорогах разных категорий и сроки их устранения. Ориентируясь на этот нормативный документ, авторы составили перечень возможных соотношений геометрических параметров неровностей нормируемой площади и размеров колес ТС, ширина которых соответствует ширине их шин. Результаты представлены в виде таблицы. Максимально допустимая площадь отдельного повреждения

(выбоины) по действующим нормам [23]  $0,06 \text{ м}^2$ . Авторы рассмотрели для примера колеса ТС с шинами посадочного диаметра 13, 14 и 15 дюймов. Проанализированы существующие шины этих типоразмеров разных производителей и найдены диапазоны ширины шин соответствующего типоразмера. Была условно принята возможная ширина выбоины, численно равная нижней границе диапазона ширины шин. Делением допустимой по стандарту [23] площади

выбоин на принятую возможную их ширину, получены максимальные длины выбоин.

В таблице приведены результаты сопоставления геометрических размеров легковых шин с посадочными диаметрами 13, 14, 15 дюймов с геометрическими размерами единичной неровности минимальной площади  $0,06 \text{ м}^2$  по ГОСТ Р 50597-2017.

На рис. 2 показана поясняющая схема к таблице.

Сопоставление геометрических размеров легковой шины с геометрическими размерами повреждения опорной поверхности минимальной площади  $S_w \geq 0,06 \text{ м}^2$

Параметры шины	Посадочный диаметр $d_{rim}$ , "	13	14	15
	Посадочный диаметр $d_{rim}$ , мм	318	343	368
	Ширина профиля шин разных производителей $B_i$ , мм	от 150 до 173	от 164 до 207	от 180 до 215
Геометрические параметры отдельного повреждения (выбоина, просадка, пролом) размером $B_w \geq 150$ мм при глубине $H_w \geq 50$ мм, имеющего ширину, сопоставимую с шириной профиля шины $B_i$	Ширина неровности $B_w$ , мм	$\geq 150$	$\geq 164$	$\geq 180$
	Длина неровности $L_w$ , мм	$\leq 400$	$\leq 366$	$\leq 333$

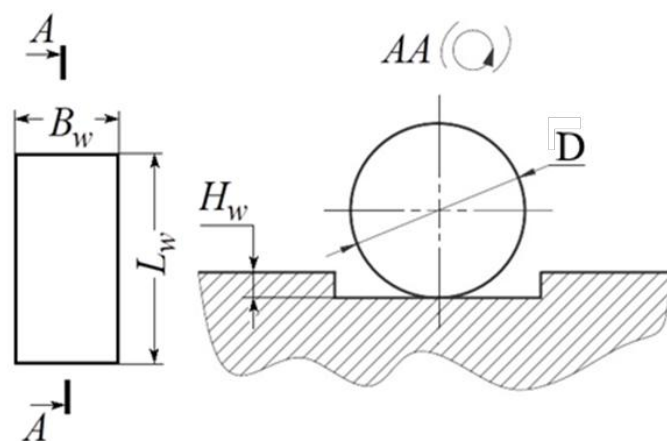


Рис. 2. Поясняющая схема к сопоставлению геометрических размеров неровности и колеса ТС

Из таблицы следует, что параметры нормируемых ГОСТ [23] дорожных выбоин соизмеримы с размерами колес ТС. Наезд на единичную неровность может привести к деформации и разрушению деталей колеса в сборе (дисков, подшипников, шин), повреждению элементов подвески и изменению прогнозируемой траектории движения ТС с ухудшением устойчивости движения и управляемости. Деформации и разрушение элементов колеса и подвески обыч-

но происходят при высоких скоростях наезда на выбоину с формой профиля, приближенной к прямоугольной.

На рис. 3 показана схема влияния параметров единичной дорожной неровности (на примере выбоины) на устойчивость движения и управляемость ТС. Из схемы видно, что устойчивость движения и управляемость определяются в основном явлениями увода колес, угловых колебаний управляемых колес и явлением нару-

шения контакта колес с дорогой. При высокой скорости движения ТС и отсутствии радиальной деформации шины в процессе переезда выбоины теряется контакт колеса с дорогой, в связи с чем нет увода и угловых колебаний управляемых колес. Это ухудшает устойчивость движения,

управляемость и тормозные свойства. Наличие радиальной деформации шины в процессе переезда выбоины на низких скоростях движения ТС приводит к появлению увода и угловых колебаний управляемых колес, что также ухудшает устойчивость движения и управляемость ТС.

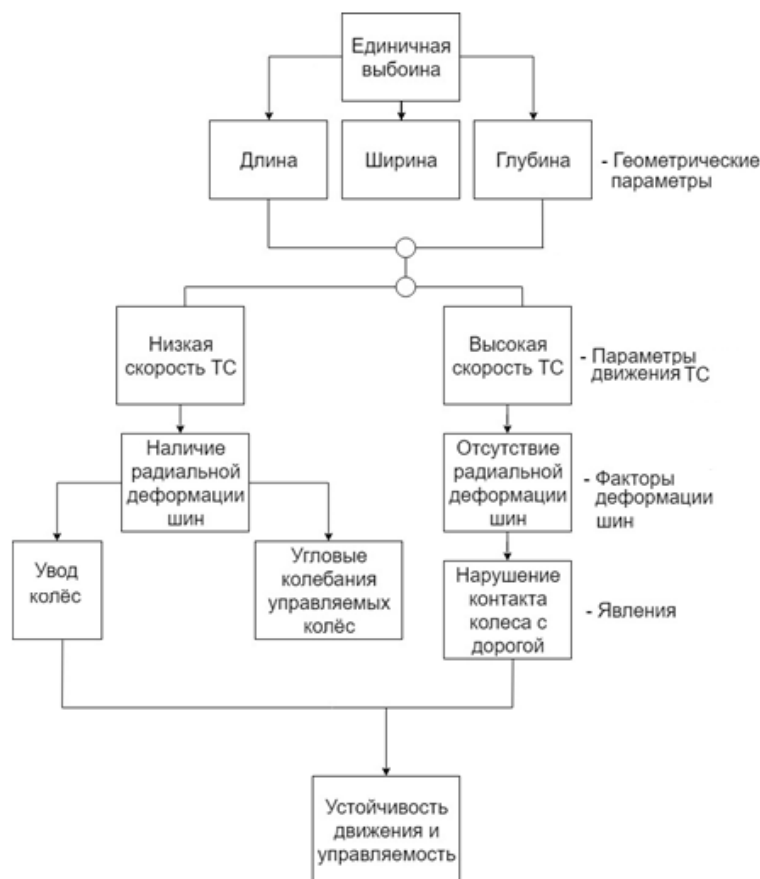


Рис. 3. Схема влияния единичной дорожной неровности на устойчивость движения и управляемость ТС

На сегодняшний день отсутствуют исследования степени и характера влияния единичных дорожных неровностей на устойчивость движения и управляемость ТС. В связи с этим необходимо провести детальный анализ траектории движения автомобиля с целью установления взаимосвязи между геометрическими параметрами единичной дорожной неровности и оценочными параметрами его устойчивости движения в разных режимах на дорогах с покрытиями разного вида и состояния. Практическое приложение такой работы позволит дать оценку и рекомендации нормируемых размеров единичных дорожных неровностей по критериям сохранения устойчивости движения и управляемости ТС.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля / В. П. Тарасик. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с. – ISBN 978-5-9775-6817-3. EDN: FOWIQZ
2. Reza, N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Application. – Springer Science + Business Media, LLC, 2008. – 1015 p.
3. Rill, G. Vehicle Dynamics: Lecture Notes. – Hochschule Regensburg University of Applied Sciences, 2009. – 200 p.
4. Wong, J. Y. (2022) Theory of Ground Vehicles, Wiley, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 560 p., DOI:10.1002/9781119719984
5. Балакина, Е. В. Коэффициент сцепления шины с дорожным покрытием / Е. В. Балакина, А. В. Кочетков. – М.: «Инновационное машиностроение», 2017. – 292 с. EDN: YMUVGX
6. Pacejka, H. B. (2012) Tire and Vehicle Dynamics. Published by Elsevier Ltd, USA, 672 p.
7. Балакина, Е. В. Расчет геометрического положения и размеров зон трения покоя и скольжения в пятне кон-

такта эластичного колеса с твердой опорной поверхностью / Е. В. Балакина // Трение и износ. – 2017. – Т. 38, № 2. – С. 136–143. EDN: TQMSKD

8. Балакина, Е. В. Расчет коэффициента сцепления устойчивого эластичного колеса с твердой опорной поверхностью при наличии боковой силы / Е. В. Балакина // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 6. – С. 756–765. EDN: FTTCWH

9. Кристальный, С. Р. Трение в контакте ошипованного колеса с твердой облещенной опорной поверхностью / С. Р. Кристальный, Е. В. Балакина, Н. В. Попов // Трение и износ. – 2022. – Т. 43, № 1. – С. 92–104. – DOI 10.32864/0202-4977-2022-43-1-92-104. EDN: GXUWGG

10. Балакина, Е. В. Универсальные зависимости параметров фрикционного взаимодействия в опорном контакте упругого колеса / Е. В. Балакина // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 2. – С. 122–134. – DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-2-122-134. – EDN: WAATOP

11. Малиновский, М. П. О важности учета увода шин и крена несущей системы при расчете критической скорости по опрокидыванию грузового автомобиля / М. П. Малиновский // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2022. – № 4(34). EDN: EMLAPF

12. Балакина, Е. В. Методика расчета угла увода автомобильного колеса с наклоненной осью вращения / Е. В. Балакина, М. С. Кочетов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 11(776). – С. 14–22. EDN: LYLPUP

13. Для расчета контурной площади пятна контакта шины / Е. В. Балакина, В. Н. Задворнов, Д. С. Сарбаев, А. А. Коньшин // Автомобильная промышленность. – 2023. – № 3. – С. 13–17. EDN: YOEWJE

14. Особенности математического моделирования криволинейного движения активного автопоезда с управляемыми колесами / А. Ф. Стариков, Н. В. Христофоров, М. П. Малиновский, Е. Ю. Мушкарин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – № 3(45). EDN: OIYHNC

15. Балакина, Е. В. Особенности численного моделирования движения колесного транспортного средства с автоматизированной системой управления торможением (Mathematical Modeling Features of the Wheeled Vehicle Movement with an Automated Braking Control System) / Е. В. Балакина, И. В. Сергиенко // Мехатроника, автоматизация, управление (Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie). – 2024. – Т. 25, № 10. – С. 537–545. – DOI: 10.17587/mau.25.537-545. EDN: IVUWAW

16. Малиновский, М. П. Ускоряемость как критерий для оценки перегрузок, действующих на автотранспортное средство при криволинейном движении / М. П. Малиновский // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 1(44). – С. 51–56. EDN: VSKFWN

17. Ларин, В. В. Теория движения полноприводных колесных машин: учебник для вузов / В. В. Ларин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 396 с.

18. Проектирование полноприводных колесных машин. В 3-х т.: учебник для вузов / Под ред. А. А. Полунгина. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

19. Груздев, А. С. Аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния диска колеса грузового автомобиля : диссертация ... кандидата технических наук : 05.05.03 / А. С. Груздев; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т (МАМИ)]. – М., 2010. – 208 с.: ил. РГБ ОД, 61 11-5/152.

20. Балабин, О. И. Анализ динамического взаимодействия автомобиля с «лежачим полицейским» / О. И. Балабин // Автомобильная промышленность. – 2025. – № 10. – С. 23–25. EDN: KQWKSC.

21. ГОСТ 32964-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Искусственные неровности сборные. Технические требования. Методы контроля (с Поправкой). – М: Стандарт информ, 2014. – 13 С.

22. Веселов, В. Н. Влияние технического уровня и эксплуатационного состояния автомобильных дорог на уровень аварийности / В. Н. Веселов // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2012. – № 1. – С. 21–26.

23. ГОСТ Р 50597-2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения.

## REFERENCES

1. Tarasik, V. P. Vehicle movement theory / V. P. Tarasik. – 2nd edition, revised and expanded. – Saint Petersburg: BHV-Petersburg, 2022. – 576 p. – ISBN 978-5-9775-6817-3. EDN: FOWIQZ

2. Reza, N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Application. – Springer Science + Business Media, LLC, 2008. – 1015 p.

3. Rill, G. Vehicle Dynamics: Lecture Notes. – Hochschule Regensburg University of Applied Sciences, 2009. – 200 p.

4. Wong, J. Y. (2022) Theory of Ground Vehicles. Wiley, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 560 p., DOI:10.1002/9781119719984

5. Balakina, E. V. Tyre adhesion coefficient to road surface / E. V. Balakina, A. V. Kochetkov. – Moscow: Innovative Engineering, 2017. – 292 p. EDN: YMUVGX

6. Pacejka, H. B. (2012) Tire and Vehicle Dynamics. Published by Elsevier Ltd, USA, 672 p.

7. Balakina, E. V. Calculation of the geometric position and the sizes of the static friction and sliding friction zones at the point of contact between an elastic wheel and a firm surface / E. V. Balakina // Journal of Friction and Wear. – 2017. – Vol. 38, No. 2. – P. 144-149. – DOI 10.3103/S1068366617020039. EDN: XNEYZX

8. Balakina, E. V. Calculation of the Friction Coefficient between a Steady Elastic Wheel and a Solid Support Surface in the Presence of a Lateral Force / E. V. Balakina // Journal of Friction and Wear. – 2019. – Vol. 40, No. 6. – P. 573-579. – DOI 10.3103/S1068366619060047. EDN: IPAUAY

9. Kristalnyi, S. R. Friction in Contact between a Studded Wheel and a Solid Ice-Covered Supporting Surface / S. R. Kristalnyi, E. V. Balakina, N. V. Popov // Journal of Friction and Wear. – 2022. – Vol. 43, No. 1. – P. 65-73. – DOI 10.3103/S106836662201007X. EDN: DORSMB.

10. Balakina, E. V. Universal Dependences of Frictional Interaction Parameters during Elastic Wheel–Road Contact / E. V. Balakina // Journal of Friction and Wear. – 2023. – Vol. 44, No. 2. – P. 77-85. – DOI 10.3103/S1068366623020022. EDN: SZPRTQ

11. Malinovsky, M. P. On the importance of taking into account tire slip and roll of the load-bearing system when calculating the critical overturning truck speed / M. P. Malinovsky // Automobile. Road. Infrastructure. – 2022. – № 4(34). EDN: EMLAPF

12. Balakina, E. V., Kochetov M.S. Method for calculating the local slip angle of a vehicle wheel with a tilted rotation axis. BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2024, no. 11, pp. 14–22.

13. Calculating the contour area of the tire contact patch / E. V. Balakina, V. N. Zadvorov, D. S. Sarbaev, A. A. Konshin // Automotive Industry. – 2023. – № 3. – P. 13-17. EDN: YOEWJE

14. Features of mathematical modelling of the curvilinear movement of an active road train with steerable wheels / A. F. Starikov, N. V. Khristoforov, M. P. Malinovsky, E. Yu. Mushkarin // *Automobile. Road. Infrastructure.* – 2025. – № 3(45). EDN: OIYHNC.
15. *Balakina, E. V.* Mathematical Modeling Features of the Wheeled Vehicle Movement with an Automated Braking Control System / E.V. Balakina, I.V. Sergienko // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie.* – 2024. - vol. 25, № 10. - P. 537-545. - DOI: 10.17587/mau.25.537-545. EDN: IVUWAW
16. *Malinovsky, M. P.* Acceleration as a criterion for assessing overloads acting on a motor vehicle during curved movement / M. P. Malinovsky // *Bulletin of the Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI).* – 2016. – № 1(44). – P. 51-56. EDN: VSKFWN.
17. *Larin, V. V.* Movement theory of all-wheel drive wheeled vehicles: textbook for universities / V.V. Larin. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2010. – 396 p.
18. Design of all-wheel drive wheeled vehicles. In 3 volumes: textbook for universities / Edited by A. A. Polungyan. – Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2008.
19. *Gruzdev, A. S.* Analytical method for calculating the stress-strain state of a truck wheel disc: thesis ... Candidate of Technical Sciences: 05.05.03 / A. S. Gruzdev; [Place of defence: Moscow State Technical University (MAMI)]. – Moscow, 2010. – 208 p.: ill. RSL OA, 61 11-5/152.
20. *Balabin, O. I.* Analysis of the dynamic interaction between a vehicle and a speed bump / O. I. Balabin // *Automotive Industry.* – 2025. – № 10. – P. 23-25. EDN: KQWKSC.
21. GOST 32964-2014 Public roads. Prefabricated artificial bumps. Technical requirements. Control methods (with Amendment). – Moscow: Standard inform, 2014. – 13 P.
22. *Veselov, V. N.* The influence of the technical condition and operational state of motorways on accident rates / V. N. Veselov // *Bulletin of Astrakhan State Technical University.* – 2012. – № 1. – P. 21–26.
23. GOST R 50597-2017. Motorways and streets. Requirements for operational condition acceptable under road safety conditions.

Статья поступила в редакцию 24.01.2026, доработана 06.02.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 24.01.2026, revised 06.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

УДК 629.33

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-112-117

Научная статья  
Original article

*Е. В. Балакина, И. В. Сергиенко, Диаа М. М. Двикат*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ ПЯТНА КОНТАКТА ШИН  
ДЛЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Екатерина Викторовна Балакина, fahrgestell2011@yandex.ru

**Аннотация.** Исследование направлено на поиск путей повышения точности проектного моделирования свойств активной безопасности транспортных средств: устойчивости движения, управляемости, тормозной динамики. Цель исследования – экспериментальное определение отношения длины пятна контакта к свободному радиусу шины. Проанализированы характеристики шин для легковых автомобилей. Сделано предположение о возможном приближенном постоянстве отношения длины пятна контакта при рекомендуемой нормальной нагрузке к свободному радиусу шины. На основании проведенных экспериментов по разработанной методике установлен диапазон числовых значений величины относительной длины пятна контакта шин.

**Ключевые слова:** автомобильная шина, свободный радиус, пятно контакта, относительная длина, экспериментальное определение

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ (из средств программы развития «Приоритет 2030» по соглашению № 075-15-2025-063) в рамках научного проекта № 9/650-24»

**Для цитирования:** Балакина Е. В., Сергиенко И. В., Двикат Диаа М. М. Экспериментальное исследование относительной длины пятна контакта шин для легковых автомобилей. *Энерго-и ресурсосбережение: промышленность и транспорт.* 2026; 1 (54): 112–117. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-112-117.

**Информация об авторах:**

**Екатерина Викторовна Балакина** – профессор, д-р техн. наук, профессор кафедры ТЭРА ВолгГТУ  
<https://orcid.org/0000-0001-5152-9340>  
e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru

**Иван Васильевич Сергиенко** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры ТЭРА ВолгГТУ  
<https://orcid.org/0000-0001-7821-6395>  
e-mail: sergienko-1993@mail.ru

**Диаа М. М. Двикат** – аспирант кафедры ТЭРА ВолгГТУ  
e-mail: deya.dw@icloud.com

**Вклад авторов:**

**Е. В. Балакина** – разработка общей концепции исследования, разработка идеи и проектирование методологии, проведение эксперимента, написание статьи.

**И. В. Сергиенко** – анализ данных, интерпретация результатов, оформление материалов.

**Диаа М. М. Двикат** – проведение эксперимента, сбор данных.

*E. V. Balakina, I. V. Sergienko, Daa M. M. Dwikat*

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE RELATIVE CONTACT  
PATCH LENGTH FOR PASSENGER CAR TIRES**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

✉ Ekaterina V. Balakina, fahrgestell2011@yandex.ru

**Abstract.** The research is aimed at finding ways to improve the accuracy of design modeling of active safety properties of vehicles: driving stability, controllability, braking dynamics. The purpose of this study was to experimentally determine the ratio of the tire contact patch length to the free radius. The characteristics of passenger car tires were analyzed. It was hypothesized that the ratio of the tire contact patch length to the free radius under the recommended normal load may be approximately constant. Based on the experiments, conducted using the developed methodology, a range of numerical values for the relative length of the tire contact patch was established.

**Keywords:** car tires, free radius, contact patch, relative length, experimental determination

**Funding:** the reported study was funded by VSTU (from the funds of the development program «Priority 2030» under the agreement № 075-15-2025-063) according to the research project No. 9/650-24.

**For citation:** Balakina E. V., Sergienko I. V., Dwikat Daa M. M. Experimental study of the relative contact patch length for passenger car tires. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 1 (54): 112–117. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-112-117.

**Information about the authors:**

**Ekaterina V. Balakina** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the TERA Department VSTU  
<https://orcid.org/0000-0001-5152-9340>

e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru

**Ivan. V. Sergienko** – PhD in Technical Sciences, is a senior lecturer at the Department of TERA VSTU

<https://orcid.org/0000-0001-7821-6395>

e-mail: sergienko-1993@mail.ru

**Diaa M. M. Dwikat** – postgraduate student of the TERA Department VSTU

e-mail: deya.dw@icloud.com

**Contribution of the authors:**

**Ekaterina V. Balakina** – final approval of the version for publication, idea development and methodology design, conducting experiments, writing the article.

**Ivan. V. Sergienko** – data analysis, result interpretation, material preparation.

**Diaa M. M. Dwikat** – conducting experiments, data collection.

Проектный выбор параметров транспортно-го средства (ТС) осуществляется на основе математического моделирования его движения в различных условиях. При этом ТС должно удовлетворять требованиям к свойствам активной безопасности: устойчивости, управляемости, тормозной динамики, а также не уступать аналогам по топливной экономичности. Все перечисленные эксплуатационные свойства в существенной мере зависят от характеристик пятна контакта каждого колеса с опорной поверхностью. Многие явления в пятне контакта на сегодняшний день требуют дальнейшего изучения [1–6]. Это явление бокового увода [7; 8], явление сноса реакций опорной поверхности, способствующее увеличению горизонтально-угловых колебаний управляемых колес

(УК), ухудшающих устойчивость движения [9] и тормозную динамику [10] ТС.

Взаимосвязь деформаций шин с боковым уводом и поворотом колеса показана на рис. 1 и 2.

На рис. 1 и 2 приняты следующие обозначения:

$P_z$  – нормальная нагрузка колеса,  $P_y$  – боковая сила колеса,  $P_x$  – толкающая сила колеса,  $R_z$  – нормальная реакция опорной поверхности,  $R_y$  – боковая реакция опорной поверхности,  $R_x$  – продольная реакция опорной поверхности,  $r_0$  – свободный радиус колеса,  $r_{rim}$  – радиус обода колеса (посадочный радиус шины),  $r_{st}$  – статический радиус колеса,  $r_d$  – динамический радиус колеса,  $Z_t, X_t, Y_t$  – линей-

ные деформации шины,  $v_x$  – продольная скорость поступательного движения колеса (продольная скорость центра колеса),  $l_0$  – плечо обкатки,  $l_c$  – длина пятна контакта,  $\beta$  – попереч-

ный угол наклона оси поворота УК,  $\gamma$  – продольный угол наклона оси поворота УК,  $\delta$  – угол бокового увода колеса,  $O$  – центр пятна контакта,  $O'$  – центр колеса.

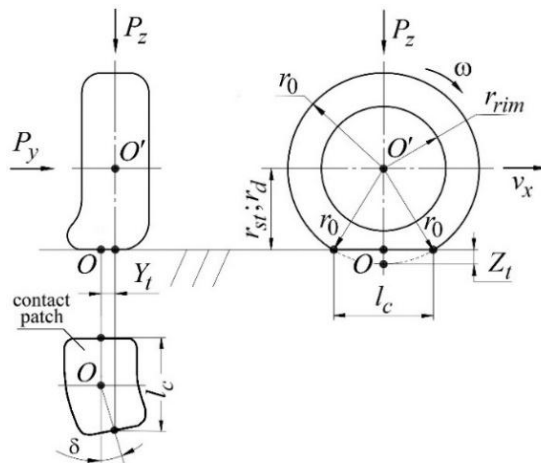


Рис. 1. Схема бокового увода колеса

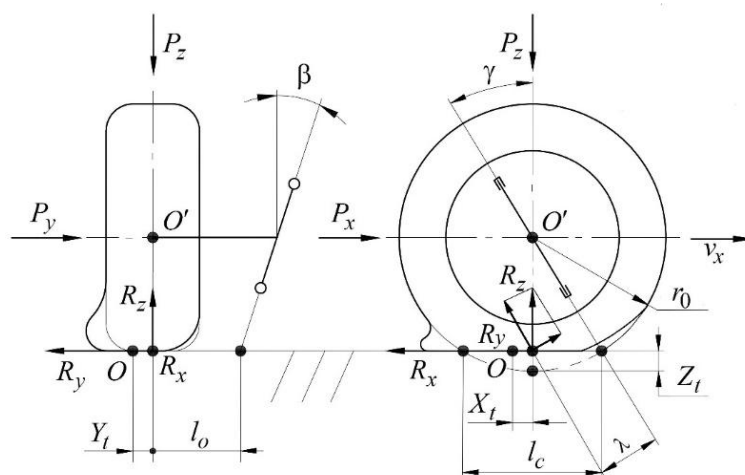


Рис. 2. Схема горизонтально-угловых колебаний УК

При моделировании криволинейного движения одиночного автомобиля или автопоезда [11] в любом режиме учет явлений бокового увода и горизонтально-управляемых колебаний УК является обязательным. В обоих случаях в расчете присутствуют основные геометрические параметры – свободный радиус и длина пятна контакта шины. Свободный радиус – величина постоянная для одной и той же шины и ее значение берется при расчетах из каталогов шин производителей. Длина пятна контакта – величина переменная. Ее числовое значение при заданной нормальной нагрузке можно приближенно определить по геометрической формуле Хедекеля, а можно по расчетно-эксперименталь-

ной зависимости [12], что достаточно трудно, так как для их использования необходимо знать величину нормальной (радиальной) деформации шины  $Z_t$  при рекомендуемой нагрузке. Иногда она указывается производителем шин. Если такой параметр отсутствует, то для его расчета при рекомендуемой нормальной нагрузке необходимо сначала определить нормальную (радиальную) жесткость шины по имеющимся математическим зависимостям [13;14].

Для поиска альтернативных путей решения задачи авторы предположили о возможном приближенном постоянстве отношения длины пятна контакта и свободного радиуса шины ( $\frac{l_c}{r_0}$ )

$r_0$

при постоянной нагрузке. Это упростило бы проектное моделирование движения ТС.

Цель исследования – экспериментальное определение отношения длины пятна контакта к свободному радиусу шины.

Для достижения цели исследования были проведены соответствующие эксперименты. Физический эксперимент состоял в следующем.

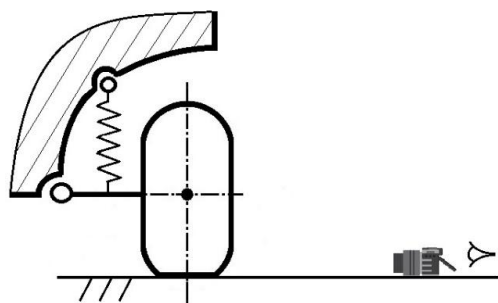


Рис. 3. Схема фотографирования длины пятна контакта

Были выбраны 32 автомобиля с конструктивной массой и с номинальным давлением в шинах, расположенные на горизонтальной недеформируемой опорной поверхности. Было выполнено фотографирование с близкого расстояния ( $\approx 1$  м) колеса с зоной пятна контакта. Объектив фотокамеры располагался примерно на уровне опорной поверхности, как показано на рис. 3.

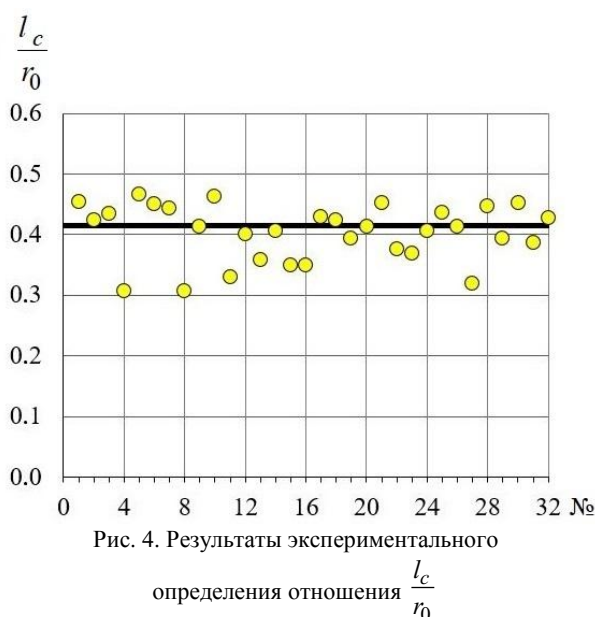
Реальное числовое значение длины пятна контакта на колесе вычислялось умножением измеренной длины пятна контакта на масштаб. Масштаб определялся по соотношению наружных диаметров диска колеса на натурном объекте (измерялся рулеткой) и на фотографии. На основании этой методики определены числовые значения отношения  $\frac{l_c}{r_0}$ . Результаты приведены в таблице и на рис. 4.

#### Результаты исследования

№	Марка и модель автомобиля	Шина	$l_c/r_0$
1	Hyundai accent	185/65R15	0.454545
2	Toyota Camry	215/60 R16	0.423077
3	Toyota Camry	215/60 R16	0.434333
4	Honda Accord	205/55 R16	0.306122
5	Audi A4	205/55 R16	0,466667
6	Volvo XC60	235/60 R18	0.45
7	Audi A4	205/55 R16	0,443782
8	Honda Accord	225/50 R17	0.306122
9	Toyota Auris	185/65 R15	0.413768
10	Kia Rio	185/65 R15	0.463415
11	Mazda 3	205/55 R16	0.330097
12	Toyota Auris	185/65 R15	0.4
13	Renault Duster	215/65 R16	0.3584
14	Skoda Octavia	195/65 R15	0.4062
15	Cherry Amulet	185/55R15	0,349206
16	Lexus RX 350	225/60 R17	0.349206
17	Honda CR-V	235/65 R17	0.429125
18	Kia Sportage	225/55 R18	0.4245
19	BA3 2106	175/70 R13	0.3943
20	Skoda Rapid	175/70 R14	0.4133
21	BA3 2115	175/70 R13	0.452632
22	Kia Spectra	185/65 R14	0.3766
23	BMW 320	205/55 R16	0.3691
24	Skoda Rapid	175/70 R14	0.40689
25	Huyndai Tucson	215/65 R16	0.4367

Окончание таблицы

№	Марка и модель автомобиля	Шина	$l_c/r_0$
26	Nissan Teana	205/65 R16	0.4127
27	Lada Granta	175/65 R14	0.319149
28	Daewoo Matiz	155/65 R13	0.4476
29	Kia Spectra	185/65 R14	0.3934
30	BA3 2115	175/65 R14	0.452632
31	BMW 320	205/55 R16	0.38642
32	Skoda Octavia	195/65 R15	0.426582



На основании проведенных исследований установлен экспериментальный диапазон отношения длины пятна контакта к свободному радиусу шины:  $0,3 \leq l_c/r_0 \leq 0,45$ . Среднее значение составляет 0,41.

Таким образом, на начальных этапах проектного моделирования движения легкового автомобиля можно приблизительно определять длину пятна контакта при рекомендуемой нормальной нагрузке через свободный радиус шины и полученный коэффициент 0,41.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля / В. П. Тарасик. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с. – (Учебная литература для вузов). – ISBN 978-5-9775-6817-3. EDN: FOWIQZ
2. Reza, N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Application. – Springer Science + Business Media, LLC, 2008. – 1015 p.

3. Rill, G. Vehicle Dynamics: Lecture Notes. – Hochschule Regensburg University of Applied Sciences, 2009. – 200 p.

4. Wong, J. Y. (2022) Theory of Ground Vehicles. Wiley, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 560 p., DOI:10.1002/9781119719984

5. Ларин, В. В. Теория движения полноприводных колесных машин: Учебник для вузов / В. В. Ларин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 396 с.

6. Проектирование полноприводных колесных машин. В 3-х т.: Учебник для вузов; под ред. А. А. Полуняна. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

7. Малиновский, М. П. О важности учета увода шин и крена несущей системы при расчете критической скорости по опрокидыванию грузового автомобиля / М. П. Малиновский // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2022. – № 4(34). EDN: EMLAPP

8. Балакина, Е. В. Методика расчета угла увода автомобильного колеса с наклонной осью вращения / Е. В. Балакина, М. С. Кочетов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 11. – С. 14–22. EDN: LYLPUF

9. Балакина, Е. В. Методика выбора размеров колес на разных осях автомобиля с АБС по критерию улучшения траекторной устойчивости при торможении / Е. В. Балакина, И. В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 12–15. EDN: DQORES

10. Балакина, Е. В. Методика выбора размеров колес на разных осях автомобиля с АБС по критерию улучшения тормозной динамики / Е. В. Балакина, И. В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 2. – С. 23–27. EDN: YOPUCK

11. Особенности математического моделирования криволинейного движения активного автопоезда с управляемыми колесами / А. Ф. Стариков, Н. В. Христофоров, М. П. Малиновский, Е. Ю. Мушкарин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2025. – № 3(45). EDN: OIYUHC

12. Балакина, Е. В. О видах расчетных радиусов колеса АТС, о необходимости и достаточности их применения в разных задачах / Е. В. Балакина, И. В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 12. – С. 1–6. EDN: HJWSVF

13. Исследование коэффициентов жесткости шин. Коэффициент боковой жесткости / Е. В. Балакина, В. Н. Задворнов, М. С. Березовский, А. С. Юсупкина // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 9. – С. 18–20. EDN: SKHQGJ

14. Исследование коэффициентов жесткости шин. Коэффициент радиальной жесткости / Е. В. Балакина,

В. Н. Задворнов, М. С. Березовский, В. П. Блажинский, А. А. Коньшин, А. С. Юсупкина // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 8. – С. 7–10. EDN: RWCEVI

## REFERENCES

1. *Tarasik, V. P.*: Automobile Movement Theory: University Textbook, p. 576. BHV-Petersburg, Russian Federation (2022).
2. *Reza, N. Jazar.* Vehicle Dynamics: Theory and Application. – Springer Science + Business Media, LLC, 2008. – 1015 p.
3. *Rill, G.* Vehicle Dynamics: Lecture Notes. – Hochschule Regensburg University of Applied Sciences, 2009. – 200 p.
4. *Wong, J. Y.* (2022) Theory of Ground Vehicles. Wiley, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 560 p., DOI:10.1002/9781119719984
5. *Larin, V. V.* Theory of Motion of All-Wheel Drive Vehicles: Textbook for Universities. M.: Bauman Moscow State Technical University. 2010. – 396 p.
6. *Polungyan, A. A.* Design of All-Wheel Drive Vehicles. In 3 volumes: Textbook for Universities. M: Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2008.
7. *Malinovsky, M. P.* On the importance of taking into account tire drift and the roll of the supporting system when calculating the critical speed for truck rollover. Automobile. Road. Infrastructure. 2022. - No. 4 (34).
8. *Balakina, E. V., Kochetov M.S.* Method for calculating the side slip angle of a vehicle wheel with a tilted rotation axis. BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2024, no. 11, pp. 14–22.
9. *Balakina, E. V., Sergienko I.V.* Methodology for selecting wheel sizes on different axles of a vehicle with ABS based on the criterion of improving trajectory stability during braking. Automotive industry. 2022; 1: 12-15.
10. *Balakina, E. V., Sergienko I.V.* Methodology for selecting wheel sizes on different axles of a vehicle with ABS based on the criterion of improving braking dynamics. Automotive industry. 2022; 2: 23-27.
11. *Starikov, A. F., N. V. Khristoforov, M. P. Malinovsky, E. Yu. Mushkarin.* Features of mathematical modeling of curvilinear motion of an active road train with steered wheels. Automobile. Road. Infrastructure. - 2025. - No. 3 (45).
12. *Balakina, E. V., Sergienko I.V.* On the types of calculated radii of vehicle wheels, the necessity and sufficiency of their application in various tasks. Automotive industry. 2022; 1: 12-15
13. *Balakina, E. V., Zadvornov V.N., Berezovsky M.S., et al.* Research of tire stiffness coefficients. Lateral stiffness coefficient. Automotive industry. 2020; 9: 18-20.
14. *Balakina, E. V., Zadvornov V.N., Berezovsky M.S., et al.* Study of tire stiffness coefficients. Radial stiffness coefficient. Automotive industry. 2020; 8: 7-10.

Статья поступила в редакцию 20.01.2026, доработана 11.02.2026, подписана в печать 13.02.2026  
The article was submitted 20.01.2026, revised 11.02.2026, accepted for publication 13.02.2026

Ответственный за выпуск: редактор РИО  
**А. Н. Сергеева**

Компьютерная верстка:  
**Е. В. Макарова**

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–64543 от 22 января 2016 г.  
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

---

**Учредитель:**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

---

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.  
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)  
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 24-80-03  
E-mail: lysak2@vstu.ru

---

Темплан 2026 г. (научные издания). Поз. № 17ж. Дата выхода в свет 30.03.2026 г. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 13,05.  
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 142.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО Издательства ВолгГТУ  
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ  
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

---

---

В научно-техническом журнале «Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области экономики.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Диск должен быть вложен в отдельный конверт, на этикетке указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, где работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.

ISSN 2500-0586



9 772500 058003 >