

# ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 2 (55)  
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.

№ 2 (55)  
Июнь  
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.

ISSN 2500-0586

**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

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

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

Journal is registered in the Federal Service for supervision  
of communications, information technology and mass media  
(Roscomnadzor) registration certificate:  
ПИ № (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

**№ 2 (55)  
June  
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

- |                          |                       |
|--------------------------|-----------------------|
| Алимов А. В. 58          | Новиков В. В. 42, 80  |
| Атаманюк Р. Г. 6         | Пан Д. В. 49          |
| Беляков И. А. 42         | Поздеев А. В. 42, 80  |
| Варвин Д. А. 37          | Соколова С. А. 12     |
| Голованов И. Ю. 12       | Сомов А. В. 28        |
| Григорьев В. В. 65       | Столбов А. Г. 65      |
| Денисов З. А. 24         | Тарасов П. С. 28      |
| Ковалев А. М. 80         | Тихонов И. Ф. 49      |
| Коноваленко А. А. 18     | Храмов В. Н. 24       |
| Конченков В. И. 28       | Чернышов К. В. 42, 80 |
| Коптелова И. А. 6        | Шилин А. Н. 6         |
| Лагуткин М. Г. 12        | Шишкин Г. А. 28       |
| Малиновский М. П. 49, 65 | Шумакова А. Н. 65     |
| Мещеряков Д. Е. 49, 65   | Эйдельман А. Л. 65    |
| Нефедьев А. И. 18, 37    |                       |

## AUTHOR INDEX

- |                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| Alimov A. V. 58         | Meshcheriakov D. E. 49, 65 |
| Atamaniuk R. G. 6       | Nefed'ev A. I. 18, 37      |
| Belyakov I. A. 42       | Novikov V. V. 42, 80       |
| Chernyshov K. V. 42, 80 | Pan D. V. 49               |
| Denisov Z. A. 24        | Pozdeev A. V. 42, 80       |
| Eidelman A. L. 65       | Shilin A. N. 6             |
| Golovanov I. Yu. 12     | Shishkin G. A. 28          |
| Grigoryev V. V. 65      | Shumakova A. N. 65         |
| Khramov V. N. 24        | Sokolova S. A. 12          |
| Konchenkov V. I. 28     | Somov A. V. 28             |
| Konovalenko A. A. 18    | Stolbov A. G. 65           |
| Koptelova I. A. 6       | Tarasov P. S. 28           |
| Kovalev A. M. 80        | Tikhonov I. F. 49          |
| Lagutkin M. G. 12       | Varvin A. A. 37            |
| Malinovsky M. P. 49, 65 |                            |

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

### Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Шилин А. Н., Коптелова И. А., Атаманюк Р. Г.</i> Морфологический метод выбора преобразователей изображений для оптико-электронных систем.....	6
<i>Соколова С. А., Голованов И. Ю., Лагуткин М. Г.</i> Оценка интенсивности теплоотдачи в трубном пространстве двухтрубных теплообменников с профильными теплообменными трубами.....	12
<i>Нефедьев А. И., Коноваленко А. А.</i> Система контроля пламени горелки.....	18
<i>Денисов З. А., Храмов В. Н.</i> Оценка величины шероховатости поверхности по измерению коэффициентов диффузного отражения лазерного излучения.....	24
<i>Конченков В. И., Сомов А. В., Тарасов П. С., Шишкин Г. А.</i> Определение типа двигательной активности по данным МЭМС-акселерометра.....	28
<i>Нефедьев А. И., Варвин Д. А.</i> Интеллектуальное зарядное устройство для свинцово-кальциевых аккумуляторов.....	37

### Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Новиков В. В., Чернышов К. В., Поздеев А. В., Беляков И. А.</i> Математическая модель подвески автомобиля с адаптивными гидроамортизаторами.....	42
<i>Пан Д. В., Малиновский М. П., Тихонов И. Ф., Мещеряков Д. Е.</i> Получение упругой характеристики листовой рессоры в ходе стендовых испытаний.....	49
<i>Алимов А. В.</i> Установка на базе коммунальной машины для удаления дорожной разметки пневмоабразивным методом.....	58
<i>Столбов А. Г., Григорьев В. В., Шумакова А. Н., Мещеряков Д. Е., Эйдельман А. Л., Малиновский М. П.</i> Особенности валидационных испытаний стоек стабилизатора поперечной устойчивости легкового автомобиля.....	65
<i>Чернышов К. В., Поздеев А. В., Новиков В. В., Ковалев А. М.</i> Дорожные испытания автомобильной подвески с инерционно-фрикционными и гидравлическими амортизаторами.....	80

## CONTENTS

---

---

### Part 1. INDUSTRY

<i>Shilin A. N., Koptelova I. A., Atamaniuk R. G.</i> Photodetector selection for an optical-electronic system by the morphological synthesis method.....	6
<i>Sokolova S. A., Golovanov I. Yu., Lagutkin M. G.</i> Assessment of the intensity of heat transfer in the tube space of two-tube heat exchangers with profile heat exchange tubes.....	12
<i>Nefed'ev A. I., Konovalenko A. A.</i> Burner flame control system.....	18
<i>Denisov Z. A., Khramov V. N.</i> The estimation of surface roughness by measuring diffuse reflection coefficients of laser radiation.....	24
<i>Konchenkov V. I., Somov A. V., Tarasov P. S., Shishkin G. A.</i> Determination of the type of motor activity according to MEMS-accelerometer data.....	28
<i>Nefed'ev A. I., Varvin A. A.</i> Smart charger for lead-calcia batteries.....	37

### Part 2. TRANSPORT

<i>Novikov V. V., Chernyshov K. V., Pozdeev A. V., Belyakov I. A.</i> Mathematical model of car suspension with adaptive hydraulic shock absorbers.....	42
<i>Pan D. V., Malinovsky M. P., Tikhonov I. F., Meshcheriakov D. E.</i> Obtaining the stiffness characteristics of a leaf spring during bench tests.....	49
<i>Alimov A. V.</i> Installation based on a municipal machine for removing road markings using the pneumatic abrasive method.....	58
<i>Stolbov A. G., Grigoryev V. V., Shumakova A. N., Meshcheryakov D. E., Eidelman A. L., Malinovsky M. P.</i> Features of validation tests of passenger car stabilizer bar links.....	65
<i>Chernyshov K. V., Pozdeev A. V., Novikov V. V., Kovalev A. M.</i> Testing of a vehicle suspension with inertial-friction and hydraulic shock absorbers.....	80

## ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 681.7.08

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-6-11

Научная статья

Original article

*А. Н. Шилин, И. А. Коптелова, Р. Г. Атаманюк***МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫБОРА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ****Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Рамез Ганиевич Атаманюк, atamanuk17@gmail.com

**Аннотация.** Рассмотрена задача выбора фотоприемника оптико-электронной системы методом морфологического синтеза с применением метода расстановки приоритетов. В качестве частных критериев приняты быстрдействие, точность, габариты и масса, надежность; в качестве вариантов реализации – сканистор, ПЗС-матрица, КМОП-матрица и матрица с параллельным опросом фотоэлементов. Методика основана на построении матриц парных сравнений: на первом этапе определяются весовые коэффициенты значимости критериев, затем – относительные приоритеты вариантов фотоприемников по каждому критерию. На заключительном этапе вычисляется комплексный приоритет каждого варианта как сумма произведений соответствующих относительных приоритетов на коэффициенты значимости критериев. Оптимальным признается вариант с наибольшим значением комплексного приоритета. Достоверность расчетов подтверждена с помощью автоматизированной системы выбора узлов оптико-электронной системы, в которой реализован метод расстановки приоритетов. По результатам сравнения четырех вариантов наибольший комплексный приоритет получен для ПЗС-матрицы. Дополнительно рассмотрены особенности применения принципа Парето и множества Парето в задачах многокритериального выбора фотоприемника.

**Ключевые слова:** фотоприемник, оптико-электронная система, морфологический синтез, метод расстановки приоритетов, матрица парных сравнений, ПЗС-матрица, многокритериальный выбор, принцип Парето

**Для цитирования:** Шилин А. Н., Коптелова И. А., Атаманюк Р. Г. Морфологический метод выбора преобразователей изображений для оптико-электронных систем. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 6–11. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-6-11.

**Информация об авторах:****Александр Николаевич Шилин** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника» ВолгГТУ<https://orcid.org/0009-0004-4893-8812>

e-mail: shanvstu@gmail.com

**Ирина Александровна Коптелова** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы» ВолгГТУ<https://orcid.org/0000-0002-3739-9807>

e-mail: shilina@yandex.ru

**Рамез Ганиевич Атаманюк** – преподаватель кафедры «Электротехника» ВолгГТУ<https://orcid.org/0009-0000-3123-6524>

e-mail: atamanuk17@gmail.com

**Вклад авторов:****А. Н. Шилин** – разработка идеи и общей концепции исследования, постановка задачи, научное руководство, редактирование статьи.**И. А. Коптелова** – разработка программного обеспечения автоматизированной системы выбора узлов оптико-электронной системы, программная реализация метода расстановки приоритетов.**Р. Г. Атаманюк** – сбор и анализ данных, проведение расчетов по матрицам парных сравнений, оформление материалов, подготовка рукописи.

A. N. Shilin, I. A. Koptelova, R. G. Atamaniuk

PHOTODETECTOR SELECTION FOR AN OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM  
BY THE MORPHOLOGICAL SYNTHESIS METHOD

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Ramez G. Atamaniuk, atamanuk17@gmail.com

**Abstract.** The paper considers the problem of photodetector selection for an optical-electronic system using the morphological synthesis method combined with the priority ranking approach. Performance, accuracy, dimensions and weight, and reliability are adopted as particular criteria; a scanistor, a CCD matrix, a CMOS matrix, and a matrix with parallel photoelement readout are considered as alternatives. The methodology is based on pairwise comparison matrices: at the first stage, weighting coefficients of the criteria are determined; then the relative priorities of the alternatives are calculated for each criterion. At the final stage, the complex priority of every alternative is computed as a sum of products of the corresponding relative priorities by the criteria weights. The variant with the highest complex priority is taken as optimal. The reliability of the calculations is confirmed by an automated system for selecting components of an optical-electronic system that implements the priority ranking method. According to the comparison of the four variants, the highest complex priority is obtained for the CCD matrix. Features of applying the Pareto principle and the Pareto set in multi-criteria photodetector selection problems are also discussed.

**Keywords:** photodetector, optical-electronic system, morphological synthesis, priority ranking method, pairwise comparison matrix, CCD matrix, multi-criteria selection, Pareto principle

**For citation:** Shilin A. N., Koptelova I. A., Atamaniuk R. G. Photodetector selection for an optical-electronic system by the morphological synthesis method. *Energо- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 2(55): 6–11. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-6-11.

**Information about the authors:**

**Alexander N. Shilin** – Dr. Sci. (Engineering), Professor Department of Electrical Engineering VSTU

<https://orcid.org/0009-0004-4893-8812>

e-mail: shanvstu@gmail.com

**Irina A. Koptelova** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor Department of Electronic Computing Machines and Systems VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-3739-9807>

e-mail: shilina@yandex.ru

**Ramez G. Atamaniuk** – Lecturer Department of Electrical Engineering VSTU

<https://orcid.org/0009-0000-3123-6524>

e-mail: atamanuk17@gmail.com

**Contribution of the authors:**

**Alexander N. Shilin** – idea development and methodology design, problem statement, scientific supervision, final approval of the version for publication.

**Irina A. Koptelova** – software development of the automated system for selecting components of the optical-electronic system, software implementation of the priority ranking method.

**Ramez G. Atamaniuk** – data collection and analysis, calculations using pairwise comparison matrices, material preparation, manuscript drafting.

**Введение**

Для выбора технического решения, а именно фотоприемника, может использоваться метод морфологического синтеза [1; 2]. Часто данный метод применяется в задачах концептуального проектирования. Этот подход позволяет исследовать множество возможных вариантов решения и структурировать их. Морфологический синтез эффективно применяется, когда традиционные методы затруднительно применить из-за многомерности и сложности проблемы.

При выборе фотоприемника методом морфологического синтеза учитывают прежде всего эксплуатационные характеристики [3; 4]. Из них на начальном этапе проектирования

должны быть выбраны основные. Для этого исследуют их функциональную связь, чтобы общее число характеристик было уменьшено до числа наиболее существенных.

Его применение предполагает попарное сравнение вариантов решения по определенным критериям.

**Материалы и методы исследования**

Методика выбора фотоприемника рассматривается с учетом частных критериев:  $k_1$  – быстродействие,  $k_2$  – точность,  $k_3$  – габариты и масса,  $k_4$  – надежность. Каждому варианту соответствует тип фотоприемника:  $X_1$  – сканистор,  $X_2$  – ПЗС-матрица,  $X_3$  – КМОП-матрица,  $X_4$  – матрица с параллельным опросом фотоэлементов.

Помимо эксплуатационных характеристик важную роль в выборе играют оценки эксперта. Сначала он определяет приоритеты значимости критериев  $k_1 - k_4$ . Затем эксперт сравнивает типы фотоприемников по каждому критерию отдельно. Приоритеты эксплуатационных характеристик определяются путем составления матриц парных сравнений [5; 6]. Это матрицы, в которых фиксируются результаты сравнений критериев. Каждой паре сравниваемых объектов соответствует одна ячейка в квадратной матрице. Рекомендуется выбирать не более 10–15 критериев, так как чем больше матрица, тем сложнее выполнить попарное сравнение элементов.

Определение значимости критериев пред-

ставим в матрице (табл. 1), применив метод расстановки приоритетов [5]. На пересечении сравниваемых критериев будем использовать коэффициенты. При этом, если данный критерий лучше, то ставится 1,5. Если сравниваемые варианты равны – 1, а если данный вариант хуже другого – 0,5. То есть критерий  $k_1$  (быстродействие) важнее  $k_2$  (точность). Поэтому в матрице элемент, находящийся на пересечении  $k_1$  и  $k_2$  равен 1,5. А критерий  $k_1$  (быстродействие) менее важен по сравнению с  $k_4$  (надежность), поэтому в матрице элемент, находящийся на пересечении  $k_1$  и  $k_4$  равен 0,5. Матрицы парных сравнений являются обратными симметричными относительно главной диагонали.

Таблица 1

Определение значимости критериев

Индекс критерия	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$\Sigma$	$\beta_j$	$\beta'_j$
$k_1$	1,0	1,5	1,5	0,5	4,5	16,250	0,275
$k_2$	0,5	1,0	1,5	0,5	3,5	12,250	0,208
$k_3$	0,5	0,5	1,0	0,5	2,5	9,250	0,157
$k_4$	1,5	1,5	1,5	1,0	5,5	21,250	0,360
Всего	–	–	–	–	–	59,000	1

После расстановки коэффициентов заполняем вектор-столбец  $\Sigma$ , в который записываем сумму элементов по строке. Столбец абсолютных приоритетов  $\beta_j$  определяется последовательным перемножением каждой из строк ( $k_1 - k_4$ ) на вектор-столбец  $\Sigma$ . А затем находим относительные приоритеты  $\beta'_j$ , которые вычисляются в долях единицы.

Вычисленные относительные приоритеты  $\beta'_j$  и являются коэффициентами значимости критериев. Максимальное значение  $\beta'_j$  соответствует самому важному критерию из рассматриваемых.

Для того чтобы сравнить фотоприемники по каждому критерию, строятся аналогичные квадратные матрицы парных сравнений (табл. 2–5). В столбцах и строках пишется но-

мер варианта (тип фотоприемника), а на пересечении те же коэффициенты 1,5; 1,0; 0,5, указывающие какой вариант предпочтительнее по данному параметру.

Для обработки всех матриц парных сравнений выполняется следующая последовательность шагов.

1) Определение абсолютных приоритетов  $B_{ij}$  вариантов. Для расчета  $B_{ij}$  каждая строка ( $X_1 - X_4$ ) в матрице умножается на вектор-столбец  $\Sigma$ .

2) Определение относительных приоритетов  $B'_{ij}$ , которые тоже вычисляются в долях единицы. Нормированные значения (относительные)  $B'_{ij}$  получаются делением  $B_{ij}$  на сумму  $\Sigma B_{ij}$ .

По этому правилу вычисляются приоритеты  $B'_{ij}$  для каждой матрицы (табл. 2–5).

Таблица 2

Сравнение фотоприемников по 1-му критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по 1-му критерию				$\Sigma$	$B_{ij}$	$B'_{ij}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$			
$X_1$	1	0,5	0,5	0,5	2,5	9,250	0,157
$X_2$	1,5	1	0,5	0,5	3,5	12,250	0,208
$X_3$	1,5	1,5	1	0,5	4,5	16,250	0,275
$X_4$	1,5	1,5	1,5	1	5,5	21,250	0,360
Всего	–	–	–	–	–	59,000	1

Таблица 3

## Сравнение фотоприемников по 2-му критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по 2-му критерию				$\Sigma$	$B_{i2}$	$B'_{i2}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$			
$X_1$	1	0,5	0,5	0,5	2,5	9,250	0,157
$X_2$	1,5	1	1,5	1,5	5,5	21,250	0,360
$X_3$	1,5	0,5	1	1,5	4,5	16,250	0,275
$X_4$	1,5	0,5	0,5	1	3,5	12,250	0,208
Всего	–	–	–	–	–	59,000	1

Таблица 4

## Сравнение фотоприемников по 3-му критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по 3-му критерию				$\Sigma$	$B_{i3}$	$B'_{i3}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$			
$X_1$	1	0,5	0,5	1,5	3,5	12,250	0,206
$X_2$	1,5	1	1	1,5	5	19,000	0,319
$X_3$	1,5	1	1	1,5	5	19,000	0,319
$X_4$	0,5	0,5	0,5	1	2,5	9,250	0,155
Всего	–	–	–	–	–	59,500	1

Таблица 5

## Сравнение фотоприемников по 4-му критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по 4-му критерию				$\Sigma$	$B_{i4}$	$B'_{i4}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$			
$X_1$	1	0,5	0,5	0,5	2,5	9,250	0,157
$X_2$	1,5	1	1,5	1,5	5,5	21,250	0,360
$X_3$	1,5	0,5	1	1,5	4,5	16,250	0,275
$X_4$	1,5	0,5	0,5	1	3,5	12,250	0,208
Всего	–	–	–	–	–	59,000	1

## Результаты и их обсуждение

На заключительном этапе вычисляем комплексный показатель (приоритет) для каждого из вариантов  $B_{i\text{ком}}$  (табл. 6) по формуле (1). Он определяется как сумма произведений относительных приоритетов типов фотоприемников на относительные приоритеты значимости критериев.

В соответствии с указанным выше методом оценить варианты решения можно с помощью комплексных приоритетов  $B_{i\text{ком}}$  по формуле:

$$B_{i\text{ком}} = \sum_{j=1}^n \beta'_j B'_{ij}, \quad (1)$$

где  $\beta'_j$  – относительный приоритет  $j$ -го критерия;  $B'_{ij}$  – относительный приоритет по  $j$ -му критерию  $i$ -го варианта;  $n$  – количество критериев ( $n = 4$ ).

Тот вариант, который имеет наибольшее значение комплексного приоритета  $B_{i\text{ком}}$ , считается оптимальным. В нашем случае это вариант  $X_2$  – ПЗС-матрица [7], у которого комплексный приоритет  $B_{2\text{ком}} = 0,311753$ .

Достоверность полученных расчетов и выбор оптимального варианта фотоприемника подтверждается автоматизированной системой выбора узлов оптико-электронной системы (АС) (рис. 1), в которой реализован метод расстановки приоритетов [2].

Верификация вышеописанной методики расчета проведена путем сравнения с программой выбора узлов.

Выбран вариант технической реализации – ПЗС-матрица.

Таблица 6

Таблица расчета комплексных приоритетов

Критерии значимости $\beta'_j$	Относительный приоритет по каждому варианту			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
0,275	0,157	0,208	0,275	0,360
0,208	0,157	0,360	0,275	0,208
0,157	0,206	0,319	0,319	0,155
0,360	0,157	0,360	0,275	0,208
Комплексный приоритет	0,164478	0,311753	0,282307	0,241463

Настройка

Список блоков проектируемого объекта  
Количество блоков: 1

№	Наименование
1	фотоприемник

Используемая шкала оценок  
Количество градаций шкалы: 9

Предпочтения	прямо	обратно
1. объекты одинаково важны	1	1
2. промежуточное значение	2	0,5
3. объект немного важнее другого	3	0,333
4. промежуточное значение	4	0,25
5. объект существенно важнее другого	5	0,2
6. промежуточное значение	6	0,167
7. объект явно важнее другого	7	0,143
8. промежуточное значение	8	0,125
9. объект абсолютно важнее другого	9	0,111
0. объекты несравнимы	0	0

Альтернативы реализации блока  
Блок: фотоприемник  
Количество вариантов: 4

№	Наименование
1	сканистор
2	ПЗС-матрица
3	КМОП-матрица
4	матрица с параллельным опросом фотоэлементов

Критерии выбора альтернатив блока  
Блок: фотоприемник  
Количество критериев: 4

№	Наименование
1	быстродействие
2	точность
3	габариты и масса
4	надежность

Рис. 1. Окно АС с исходными данными задачи

Программа выбора узлов оптико-электронной системы

Файл Проведение расчета Просмотр результатов Настройка О программе

КРАТКИЙ РЕЗУЛЬТАТ РАБОТЫ ЭКСПЕРТА:  
=====

Были выбраны следующие варианты реализации блоков:  
1. фотоприемник - выбрана техническая реализация ПЗС-матрица

Рис. 2. Вывод результата выбора фотоприемника в АС

Если рассматривать принцип Парето [8], выбранный вариант  $X_2$  (ПЗС-матрица) принадлежит множеству Парето-оптимальных решений: его нельзя улучшить ни по одному критерию без ухудшения по какому-либо другому. Помимо  $X_2$ , в множество Парето входят варианты  $X_3$  (КМОП-матрица) и  $X_4$  (матрица с параллельным опросом). Вариант  $X_1$  (сканистор)

доминируется вариантом  $X_2$  по всем четырем критериям и поэтому из рассмотрения исключается.

Множество Парето предоставляет ЛПР информацию о компромиссных решениях и позволяет выбирать вариант технической реализации в зависимости от предпочтений. При изменении приоритетов между быстродействием,

точностью, габаритами и массой, надежностью эксперт может перейти к другому варианту из этого множества без необходимости пересчета всей задачи.

### Выводы

Разработана методика выбора фотоприемника оптико-электронной системы методом морфологического синтеза с применением метода расстановки приоритетов, обеспечивающая одновременный учет нескольких эксплуатационных характеристик: быстродействия, точности, габаритов и массы, надежности.

На основе матриц парных сравнений определены весовые коэффициенты значимости критериев и относительные приоритеты вариантов фотоприемников; рассчитаны комплексные приоритеты четырех типов фотоприемников. Установлено, что наибольшим комплексным приоритетом (0,311753) обладает ПЗС-матрица, что позволяет рекомендовать ее как оптимальный вариант в рассмотренной постановке задачи.

Достоверность полученных результатов подтверждена с помощью автоматизированной системы выбора узлов оптико-электронной системы. Показано, что выбранный вариант (ПЗС-матрица) принадлежит множеству Парето-оптимальных решений. Использование множества Парето позволяет гибко выбирать вариант технической реализации в зависимости от предпочтений ЛПР.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шилин, А. Н. Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / А. Н. Шилин, И. А. Шилина (Коптелова) // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 3. – С. 51–61.
2. Шилин, А. Н. Использование уравнений совместности элементов в методике морфологического синтеза оптико-электронных приборов / А. Н. Шилин, И. А. Коптелова, М. В. Гиркин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3 (51) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь»; вып. 3). – С. 64–69. – URL: <https://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/12/2009-03.pdf> (дата обращения: 01.05.2026).
3. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов : учебник для вузов / Ю. Г. Якушенков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Логос, 2011. – 568 с. – ISBN 978-5-98704-533-6.
4. Ишанин, Г. Г. Приемники оптического излучения : учебное пособие / Г. Г. Ишанин, В. П. Челибанов. –

СПб. : Лань, 2022. – 304 с. – ISBN 978-5-8114-1048-4. – URL: <https://e.lanbook.com/book/211730> (дата обращения: 01.05.2026). – Текст : электронный.

5. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с. – ISBN 5-256-00443-3.

6. Блюмин, С. Л. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности / С. Л. Блюмин, И. А. Шуйкова ; Липец. экол.-гуманит. ин-т. – Липецк, 2001. – 139 с. – ISBN 5-900037-19-3.

7. Носов, Ю. Р. Основы физики приборов с зарядовой связью / Ю. Р. Носов, В. А. Шилин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 318 с. – (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов).

8. Ногин, В. Д. Принятие решений при многих критериях : учебно-методическое пособие / В. Д. Ногин ; Гос. ун-т – Высш. школа экономики, Санкт-Петерб. фил. – СПб. : Ютас, 2007. – 103 с. – ISBN 978-5-91185-026-5.

### REFERENCES

1. Shilin, A. N., Shilina (Koptelova) I. A. Morphological synthesis of optical-electronic systems for measuring the dimensions of heated parts. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2003, no. 3, pp. 51–61. (In Russ.).
2. Shilin, A. N., Koptelova I. A., Girkin M. V. The use of element compatibility equations in the methodology of morphological synthesis of optical-electronic devices. *Izvestiya VolgGTU. Series: Electronics, Measuring Technology, Radio Engineering and Communication*, 2009, no. 3 (51), iss. 3, pp. 64–69. (In Russ.). Available at: <https://www.vstu.ru/uploadiblok/files/izvestiya/archive/12/2009-03.pdf> (accessed 01.05.2026).
3. Yakushenkov, Yu. G. *Teoriya i raschyot optiko-elektronnykh priborov* [Theory and calculation of optical-electronic devices]: textbook for universities. 6th ed., rev. and enl. Moscow, Logos Publ., 2011. 568 p. (In Russ.). ISBN 978-5-98704-533-6.
4. Ishanin, G. G., Chelibanov V. P. *Priemniki opticheskogo izlucheniya* [Optical radiation receivers]: tutorial. St. Petersburg, Lan Publ., 2022. 304 p. (In Russ.). ISBN 978-5-8114-1048-4. Available at: <https://e.lanbook.com/book/211730> (accessed 01.05.2026).
5. Saaty, T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. The analytic hierarchy process]. Translated from English by R. G. Vachnadze. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1993. 320 p. (In Russ.). ISBN 5-256-00443-3.
6. Blyumin, S. L., Shuykova I. A. *Modeli i metody prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennosti* [Models and methods of decision making under uncertainty]. Lipetsk Ecological-Humanitarian Institute. Lipetsk, 2001. 139 p. (In Russ.). ISBN 5-900037-19-3.
7. Nosov, Yu. R., Shilin V. A. *Osnovy fiziki priborov s zaryadovoy svyazyu* [Fundamentals of the physics of charge-coupled devices]. Moscow, Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1986. 318 p. (In Russ.).
8. Nogin, V. D. *Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh* [Multicriteria decision making]: tutorial. State University – Higher School of Economics, St. Petersburg Branch. St. Petersburg, YuTAS Publ., 2007. 103 p. (In Russ.). ISBN 978-5-91185-026-5.

Статья поступила в редакцию 14.05.2026, доработана 17.05.2026, подписана в печать 18.05.2026

The article was submitted 14.05.2026, revised 17.05.2026, accepted for publication 18.05.2026

УДК 66.045.123  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-12-17

Научная статья  
Original article

*С. А. Соколова, И. Ю. Голованов, М. Г. Лагуткин*  
**ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ  
В ТРУБНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ДВУХТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ  
С ПРОФИЛЬНЫМИ ТЕПЛООБМЕННЫМИ ТРУБАМИ**

Московский политехнический университет, Москва, Россия

✉ Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

**Аннотация.** В статье представлены данные об интенсивности теплоотдачи со стороны трубного пространства в теплообменных аппаратах с профильными теплообменными трубами. Данные получены с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе «SolidWorks». В качестве профиля сечения теплообменных труб рассмотрены эпициклоиды с количеством каспов 1–10. Показано, что теплообменные трубы с профилем сечения в форме эпициклоиды с 4–10 каспами обеспечивают больший коэффициент теплоотдачи в сравнении с трубой круглого сечения. На основании данных компьютерного моделирования получено уточненное уравнение для определения критерия Нуссельта в трубном пространстве двухтрубных теплообменных аппаратов с профильными теплообменными трубами.

**Ключевые слова:** двухтрубный теплообменный аппарат, профильные теплообменные трубы, компьютерное моделирование, трубное пространство, коэффициент теплоотдачи, расчет

**Для цитирования:** Соколова С. А., Голованов И. Ю., Лагуткин М. Г. Оценка интенсивности теплоотдачи в трубном пространстве двухтрубных теплообменников с профильными теплообменными трубами. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 12–17. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-12-17.

**Информация об авторах:**

**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

**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

**Михаил Георгиевич Лагуткин** – д-р техн. наук, профессор, 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:**

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

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

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

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

**ASSESSMENT OF THE INTENSITY OF HEAT TRANSFER IN THE TUBE SPACE  
OF TWO-TUBE HEAT EXCHANGERS WITH PROFILE HEAT EXCHANGE TUBES**

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

✉ Ivan Yu. Golovanov, igol95@yandex.ru

**Abstract.** The article presents data on the intensity of heat transfer from the pipe space in heat exchangers with profile heat exchange tubes. The data were obtained using computer modeling in the SolidWorks software package. Epicycloids with a number of cusps of 1–10 are considered as the cross-section profile of heat exchange pipes. It is shown that heat exchange pipes with a cross-section profile in the form of an epicycloid with 4–10 cusps provide a higher heat transfer coefficient in comparison with a round tube. Based on computer simulation data, a refined equation was obtained for determining the Nusselt criterion in the tube space of two-tube heat exchangers with profile heat exchange tubes.

**Keywords:** two-tube heat exchanger, profile heat exchange pipes, computer modeling, pipe space, heat transfer coefficient, calculation

**For citation:** Sokolova S. A., Golovanov I. Yu., Lagutkin M. G. Assessment of the intensity of heat transfer in the tube space of two-tube heat exchangers with profile heat exchange tubes. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026, 2(55): 12–17. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-12-17.

**Information about the authors:**

**Svetlana A. Sokolova** – Assistant of the Department «Environmental Safety of technical systems» of Moscow Polytechnic University

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

e-mail: sveta-sveta1223@mail.ru

**Ivan Yu. Golovanov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department «AO&ATP named after Prof. M. B. Generalov» of Moscow Polytechnic University

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

e-mail: igol95@yandex.ru

**Mikhail G. Lagutkin** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department «AO&ATP named after Prof. M. B. Generalov» of Moscow Polytechnic University

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

e-mail: lag53@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Svetlana A. Sokolova** – conducting research, designing graphic materials, writing articles.

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

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

Известно, что повышение интенсивности процесса теплопередачи возможно за счет использования профильных теплообменных труб [1–8]. Такие трубы могут одновременно повышать турбулентность потоков теплоносителей и увеличивать площадь поверхности теплопередачи без изменения габаритов аппарата.

Интенсивность процесса теплопередачи в рекуперативных теплообменных аппаратах определяется коэффициентом теплопередачи, входящим в основное уравнение теплопередачи [9]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где  $Q$  – количество передаваемого тепла в двухтрубном теплообменном аппарате (определяется из теплового баланса), Вт;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F$  – площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – средняя разность температур между теплоносителями, °C.

При теплопередаче через цилиндрическую стенку (теплообменную трубу) может определяться количество тепла, передаваемого через единицу длины теплообменной трубы. В таких случаях используется линейный коэффициент теплопередачи, определяемый по уравнению [9]:

$$K_{\text{л}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{т}} \cdot d_{\text{в}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{мг}} \cdot d_{\text{н}}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}} + R_{\text{заг}}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{л}}$  – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·°C);  $\alpha_{\text{т}}$  – коэффициент теплоотдачи трубного пространства, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $d_{\text{в}}$  – внутренний диаметр теплообменной трубы, м;  $\alpha_{\text{мг}}$  – коэффициент теплоотдачи межтрубного пространства, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $d_{\text{н}}$  – наружный диаметр теплообменной трубы, м;  $\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициент теплопроводности материала теплопередающей стенки, Вт/(м·°C);  $R_{\text{заг}}$  – термическое сопротивление загрязнений на теплопередающей стенке, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

Для определения коэффициента теплопередачи в уравнение (2) добавляется величина среднего диаметра теплообменной трубы [9]:

$$K_{\text{л}} = \frac{1}{d_{\text{ср}} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{\text{т}} \cdot d_{\text{в}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{мг}} \cdot d_{\text{н}}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}} + R_{\text{заг}} \right)}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{ср}}$  – средний диаметр теплообменной трубы, м.

На практике уравнения (2), (3) используются только для толстостенных теплообменных труб (например, в трубопроводах с теплоизоляцией). При малой толщине стенки теплообменных труб (отношение толщины стенки трубы к ее внутреннему диаметру менее 0,4) коэффициент теплопередачи определяется по уравнению теплопередачи через плоскую стенку [9]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{т}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{мг}}} + R_{\text{заг}}}, \quad (4)$$

где  $\delta_{\text{ст}}$  – толщина теплопередающей стенки, м.

Интенсивность процесса теплопередачи ограничена величиной меньшего из коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{\text{т}}$ ,  $\alpha_{\text{мг}}$ . Для повышения интенсивности процесса теплопередачи в двухтрубном теплообменном аппарате рационально повышать величину лимитирующего коэффициента теплоотдачи. При этом применение профильных труб в теплообменных аппаратах может повышать интенсивность теплоотдачи как со стороны трубного, так и со стороны межтрубного пространств одновременно.

Критериальное уравнение для определения коэффициентов теплоотдачи трубного и межтрубного пространств при движении теплоносителя в двухтрубном теплообменном аппарате имеет следующий вид [9; 10]:

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (5)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля.

Критерий Нуссельта характеризует отношение интенсивности конвекции к интенсивности теплопроводности и записывается в следующем виде [9; 10]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $d$  – диаметр канала в теплообменном аппарате, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·°С).

Критерий Рейнольдса характеризует отношение сил инерции к силам вязкости в потоке теплоносителя и определяется по уравнению [9; 10]:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (7)$$

где  $w$  – скорость теплоносителя, м/с;  $\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с.

Критерий Прандтля характеризует отношение воздействия вязкостных эффектов к интенсивности теплопроводности в теплоносителе [9; 10]:

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (8)$$

где  $c$  – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С).

Согласно уравнению (7), увеличение скорости теплоносителя приводит к повышению ве-

личины критерия Рейнольдса. В соответствии с уравнением (5), повышается величина критерия Нуссельта и, следовательно, коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  (6). Стоит учитывать, что повышение скорости теплоносителя приводит к возрастанию потерь мощности на перекачивание теплоносителей.

Коэффициент теплоотдачи трубного пространства в двухтрубном теплообменном аппарате с теплообменной трубой круглого сечения определяется с помощью известного уравнения [10]:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr/Pr_{ст})^{0,25}, \quad (9)$$

где  $Pr_{ст}$  – критерий Прандтля при температуре теплопередающей стенки.

При нагревании жидкости отношение  $(Pr/Pr_{ст})^{0,25}$  можно принимать равным 1, при охлаждении жидкости – равным 0,93 [10].

В статье [11] показано, что использование теплообменных труб с профилем сечения в форме эпициклоиды в двухтрубных теплообменных аппаратах повышает интенсивность теплоотдачи со стороны межтрубного пространства.

С использованием компьютерного моделирования в программном комплексе «SolidWorks» проанализируем интенсивность теплоотдачи в трубном пространстве в двухтрубных теплообменных аппаратах типовой конструкции и с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с количеством каспов от 1 до 10 (рис. 1).

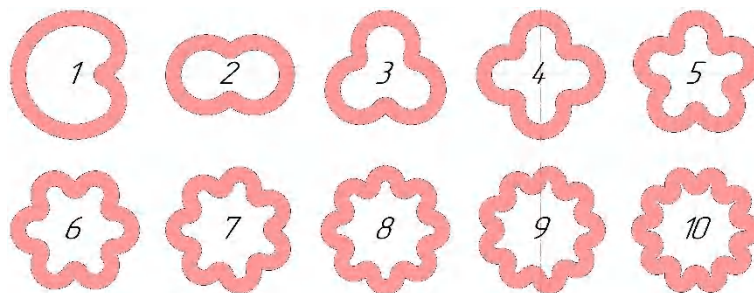


Рис. 1. Профиль сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды:  
1 – 1 касп; 2 – 2 каспа; 3 – 3 каспа; 4 – 4 каспа; 5 – 5 каспов; 6 – 6 каспов;  
7 – 7 каспов; 8 – 8 каспов; 9 – 9 каспов; 10 – 10 каспов

Исходные данные для моделирования [11; 12]: кожуховая труба диаметром 57×4 мм и длиной 1400 мм; теплообменная труба в типовой конструкции диаметром 25×3 мм и длиной 1500 мм (эквивалентный диаметр труб с профилем сечения в форме эпициклоиды определяется из условия достижения равенства площадей их поперечного сечения с площадью поперечного

сечения теплообменной трубы в типовой конструкции); длина поверхности теплопередачи во всех конструкциях равна 1400 мм; патрубки межтрубного пространства диаметром 50×4 мм и длиной 155 мм; материал теплообменных аппаратов – сталь марки 08X18H10T (AISI 321) с теплоемкостью равной 504 Дж/(кг·°С) и коэффициентом теплопроводности равным 17 Вт/(м·°С).

Исходные технологические параметры: теплоносители трубного и межтрубного пространств – вода; температура воды на входе в трубное пространство – 60 °С; температура воды на входе в межтрубное пространство – 20 °С; объемный расход воды в трубном пространстве – от  $7,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Re=10000$ ) до  $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Re=40000$ ); объемный расход воды в межтрубном пространстве – от  $5,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Re=10000$ ) до  $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Re=40000$ ).

По итогам компьютерного моделирования получена графическая зависимость коэффициента теплоотдачи трубного пространства двух-

трубных теплообменных аппаратов типовой конструкции и с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 1–10 каспами от величины критерия Рейнольдса в трубном пространстве (рис. 2).

Из зависимости на рис. 2 можно сделать вывод, что, в сравнении с трубой круглого сечения, использование теплообменных труб с поперечным сечением в форме эпициклоиды с 4–10 каспами увеличивает коэффициент теплоотдачи трубного пространства (соизмеримые значения при  $10000 < Re < 25000$  и увеличение при  $25000 < Re < 40000$ ).

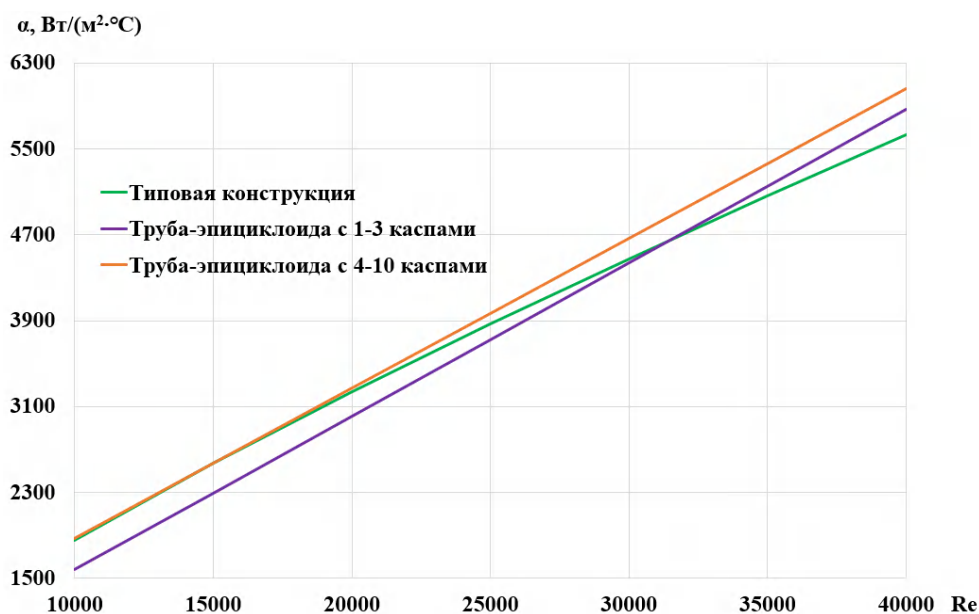


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи трубного пространства от величины критерия Рейнольдса в двухтрубных теплообменных аппаратах

Для двухтрубных теплообменных аппаратов с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 4–10 каспами получено уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи трубного пространства с уточненными эмпирическими коэффициентами (отклонения от результатов компьютерного моделирования менее 5 % в диапазоне величины критерия Рейнольдса 10000–40000):

$$Nu_{\tau} = 0,034 \cdot Re^{0,77} \cdot Pr^{0,4} \cdot (Pr/Pr_{cr})^{0,25}. \quad (10)$$

В статье [11] представлено уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства двухтрубных теплообменных аппаратов с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 1–10 каспами в диапазоне величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве 10000–24000:

$$Nu_{mr} = 5,25 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,2} \cdot Pr^{0,4} \cdot (Pr/Pr_{cr})^{0,25}. \quad (11)$$

В настоящем исследовании было проведено компьютерное моделирование, которое подтвердило применимость уравнения (11) в том числе и для диапазона величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве 24000–40000 (отклонения от результатов компьютерного моделирования менее 5 %).

Коэффициент теплоотдачи межтрубного пространства двухтрубного теплообменного аппарата типовой конструкции определяется с использованием известного уравнения (9).

На рис. 3 представлена графическая зависимость коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства двухтрубных теплообменных аппаратов типовой конструкции и с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 1–10 каспами от величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве в соответствии с уравнениями (9), (11).

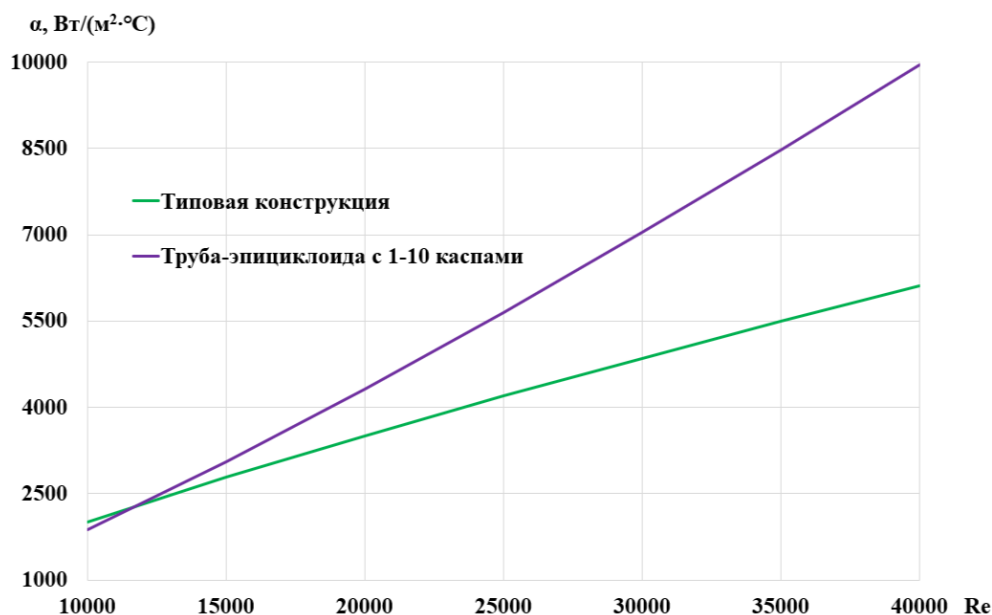


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства от величины критерия Рейнольдса в двухтрубных теплообменных аппаратах

Из зависимости на рис. 3 можно сделать вывод, что использование теплообменных труб с поперечным сечением в форме эпициклоиды также увеличивает и коэффициент теплоотдачи межтрубного пространства в сравнении с трубой круглого сечения. Таким образом, использование теплообменных труб с поперечным сечением в форме эпициклоиды с 4–10 каспами позволит повысить интенсивность процесса теплопередачи за счет увеличения коэффициента теплопередачи по сравнению с двухтрубным теплообменным аппаратом с трубой круглого сечения.

Уравнения (10), (11) позволяют проводить технологический расчет теплообменных аппаратов с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды в диапазоне величины критерия Рейнольдса в трубном и межтрубном пространствах 10000–40000.

#### Выводы

1. С использованием компьютерного моделирования получены данные об интенсивности теплоотдачи со стороны трубного пространства в двухтрубных теплообменных аппаратах с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 1–10 каспами.

2. На основании графических зависимостей, полученных с использованием данных компьютерного моделирования, показано, что, в сравнении с типовой конструкцией двухтрубного теплообменного аппарата, в конструкциях с профилем сечения теплообменных труб

в форме эпициклоиды с 4–10 каспами наблюдается более интенсивная теплоотдача со стороны трубного и межтрубного пространств, что обеспечивает повышение интенсивности теплопередачи.

3. Получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи трубного пространства двухтрубных теплообменных аппаратов с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 4–10 каспами.

4. По результатам компьютерного моделирования подтверждено, что полученное ранее уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи межтрубного пространства двухтрубных теплообменных аппаратов с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 1–10 каспами применимо для диапазона величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве 10000–40000.

5. Представленные в статье уравнения позволяют проводить технологический расчет двухтрубных теплообменных аппаратов с профилем сечения теплообменных труб в форме эпициклоиды с 4–10 каспами в диапазоне величины критерия Рейнольдса в трубном и межтрубном пространствах 10000–40000.

#### 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. *Вайцехович, С. М.* Пассивные интенсификаторы в теплообменных аппаратах / С. М. Вайцехович, Ю. В. Власов, А. Ю. Журавлев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 6. – С. 277–284.

3. *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>.

4. *Вайцехович, С. М.* Спирально-профильные трубы в теплообменной технике / С. М. Вайцехович, Ю. В. Власов, А. Ю. Журавлев // Вестник НПО Техномаш. – 2020. – № 3 (12). – С. 23–33.

5. *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>.

6. *Чернявская, В. В.* Оценка влияния профиля теплообменной трубы на энергомассовую эффективность кристаллизаторов / В. В. Чернявская, В. Б. Сапожников, М. А. Угольникова, И. Ю. Голованов // Холодильная техника. – 2025. – Т. 114, № 2. – С. 77–84. – URL: <https://www.doi.org/10.17816/RF641891>.

7. *Вайцехович, С. М.* Инновационные технологии оребрения труб и разработка рекомендаций по совершенствованию теплообменников / С. М. Вайцехович, А. В. Бараев // Вестник НПО Техномаш. – 2018. – № 3 (7). – С. 52–56.

8. *Golovanov, I. Yu.* Heat exchange pipes of a new profile to increase the efficiency of heat power equipment / I. Yu. Golovanov, D. D. Dayanova, M. G. Lagutkin [et al.] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2025. – № 2 (416). – P. 260–268. – URL: [https://www.doi.org/10.47367/0021-3497\\_2025\\_2\\_260](https://www.doi.org/10.47367/0021-3497_2025_2_260).

9. *Вайцехович, С. М.* Паровые водотрубные котлоагрегаты с использованием спирально-профильных труб для морских надводных и подводных судов / С. М. Вайцехович, А. В. Бараев // Вестник НПО Техномаш. – 2018. – № 2 (6). – С. 50–52.

10. *Касаткин, А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – Москва: Альянс, 2020. – 752 с.

11. *Павлов, К. Ф.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное 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.

12. *Голованов, И. Ю.* Повышение интенсивности теплопередачи двухтрубных теплообменных аппаратов при использовании профильных труб / И. Ю. Голованов, С. А. Соколова, М. Г. Лагуткин // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2026. – № 1 (54). – С. 6–11. – URL: <https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2026-1-54-6-11>.

13. *Лашинский, А. А.* Конструирование сварных химических аппаратов: справочник / А. А. Лашинский; под ред. А. Р. Толчинского. – Изд. 2-е, стер. – М.: Альянс, 2008. – 384 с.

*nyavskaya, M. G. Latgutkin, 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. *Vaitsekhovich, S. M.* Passive intensifiers in heat exchange devices / S. M. Vaitsekhovich, Yu. V. Vlasov, A. Yu. Zhuravlev // Assembly in mechanical engineering, instrument engineering. – 2020. – № 6. – P. 277-284.

3. *Golovanov, I. Yu.* Оценка эффективности теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» различных конструкций / I. Yu. Golovanov, K. O. Zanina, M. G. Latgutkin, S. A. Sokolova // 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>.

4. *Vaitsekhovich, S. M.* Spiral profile pipes in heat exchange technology / S. M. Vaitsekhovich, Yu. V. Vlasov, A. Yu. Zhuravlev // Bulletin of NPO Technomash. – 2020. – № 3 (12). – P. 23-33.

5. *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>.

6. *Chernyavskaya, V. V.* Evaluation of the influence of the heat exchange pipe profile on the energy and mass efficiency of crystallizers / V. V. Chernyavskaya, V. B. Sapozhnikov, M. A. Ugolnikova, I. Yu. Golovanov // Refrigeration technology. – 2025. – Vol. 114, № 2. – P. 77-84. – URL: <https://www.doi.org/10.17816/RF641891>.

7. *Vaitsekhovich, S. M.* Innovative pipe finning technologies and development of recommendations for improving heat exchangers / S. M. Vaitsekhovich, A. V. Baraev // Bulletin of NPO Technomash. – 2018. – № 3 (7). – P. 52-56.

8. *Golovanov, I. Yu.* Heat exchange pipes of a new profile to increase the efficiency of heat power equipment / I. Yu. Golovanov, D. D. Dayanova, M. G. Lagutkin [et al.] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2025. – № 2 (416). – P. 260-268. – URL: [https://www.doi.org/10.47367/0021-3497\\_2025\\_2\\_260](https://www.doi.org/10.47367/0021-3497_2025_2_260).

9. *Vaitsekhovich, S. M.* Steam water-tube boilers using spiral-shaped pipes for marine surface and underwater vessels / S. M. Vaitsekhovich, A. V. Baraev // Bulletin of NPO Technomash. – 2018. – № 2 (6). – P. 50-52.

10. *Kasatkin, A. G.* Basic processes and devices of chemical technology. Textbook for universities. – Moscow: Alliance, 2020. – 752 p.

11. *Pavlov, K. F., Romankov, P. G., Noskov, A. A.* Examples and tasks in the course of processes and devices of chemical technology. Textbook for universities / edited by corresponding member. Academy of Sciences of the USSR P. G. Romankov. – 10th ed., revised. and additional – Leningrad: Chemistry, 1987. – 576 p.

12. *Golovanov, I. Yu.* Increasing the intensity of heat transfer of two-tube heat exchangers using profile pipes / I. Yu. Golovanov, S. A. Sokolova, M. G. Lagutkin // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2026. – № 1 (54). – P. 6-11. – URL: <https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2026-1-54-6-11>.

13. *Lashchinsky, A. A.* Construction of welded chemical apparatuses: a reference book / A. A. Lashchinsky; edited by A. R. Tolchinsky. – 2nd edition, stereotypical. – Moscow: Alliance, 2008. – 384 p.

## REFERENCES

1. *Chernyavskaya, V. V.* Analysis of structures and prospects for improving tubular heat exchangers / V. V. Chernyavskaya, M. G. Latgutkin, 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>.

Статья поступила в редакцию 23.04.2026, доработана 07.05.2026, подписана в печать 13.05.2026

The article was submitted 23.04.2026, revised 07.05.2026, accepted for publication 13.05.2026

УДК 697:620.9  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-18-23

Научная статья  
Original article

*А. И. Нефедьев, А. А. Коноваленко*

### СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ ГОРЕЛКИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

**Аннотация.** В работе представлена система контроля пламени горелки для водогрейных котлов. В систему входят четыре датчика, работающие на разных физических принципах: оптический датчик на основе приборов с зарядовой связью, пирометрический, звуковой и газовый (лямбда-зонд) с необходимыми устройствами преобразования сигналов, и микроконтроллер, обеспечивающий обработку сигналов с четырех датчиков. Для отображения состояния датчиков система контроля пламени горелки содержит панель индикации. Внедрение системы контроля пламени в промышленность позволит повысить безопасность эксплуатации котельного оборудования, и существенно снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** пламя, горелка, ПЗС, пирометрический датчик, звуковой датчик, лямбда-зонд, микроконтроллер, панель индикации

**Для цитирования:** Нефедьев А. И., Коноваленко А. А. Система контроля пламени горелки. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55):18–23. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-18-23.

#### Информация об авторах:

**Алексей Иванович Нефедьев** – доцент, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника» ВолГТУ  
<https://orcid.org/0000-0002-1470-3618>  
e-mail: nefediev@rambler.ru

**Артем Александрович Коноваленко** – ассистент кафедры «Энергоснабжение, теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» Института архитектуры и строительства ВолГТУ  
e-mail: artyom.konovalenko34@yandex.ru

#### Вклад авторов:

**А. И. Нефедьев** – разработка общей концепции построения системы, написание статьи.

**А. А. Коноваленко** – сборка, настройка и исследование устройства, оформление материалов, написание статьи.

*A. I. Nefed'ev, A. A. Konovalenko*

### BURNER FLAME CONTROL SYSTEM

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alexey I. Nefed'ev, nefediev@rambler.ru

**Abstract.** This paper presents a burner flame monitoring system for hot water boilers. The system includes four sensors operating on different physical principles: an optical sensor based on charge-coupled devices, a pyrometric sensor, a sound sensor, and a gas (lambda) sensor with the necessary signal conversion devices. A microcontroller processes the signals from the four sensors. To display the sensor status, the burner flame monitoring system includes an indicator panel. Implementing this flame monitoring system in industry will improve the safety of boiler equipment and significantly reduce the likelihood of emergency situations.

**Keywords:** flame, burner, CCD, pyrometric sensor, sound sensor, lambda probe, microcontroller, indicator panel

**For citation:** Nefed'ev A. I., Konovalenko A. A. Burner flame control system. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 2(55): 18–23. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-18-23.

#### Information about the authors:

**Alexey I. Nefed'ev** – Doc. Tech. Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering VSTU  
<https://orcid.org/0000-0002-1470-3618>  
e-mail: nefediev@rambler.ru

**Artyom A. Konovalenko** – Assistant Professor at the Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation at the Institute of Architecture and Construction of VSTU.  
e-mail: artyom.konovalenko34@yandex.ru

#### Contribution of the authors:

**Alexey I. Nefed'ev** – development of the overall system design concept, article writing

**Artyom A. Konovalenko** – assembly, configuration, and device research, materials preparation, article writing.

В настоящее время нагрев воды производится с помощью водогрейных котлов. Пламя горелки не всегда устойчиво, и иногда оно гаснет, или происходит его отрыв от горелки, что создает угрозу взрыва в топке. Поэтому котельное оборудование оснащается системой контроля пламени в обязательном порядке.

Проблемы с горелкой водогрейных котлов возникают из-за технических неисправностей или ошибок в эксплуатации. Для диагностики горелок нужно учитывать вид топлива и конструкцию котельного агрегата. Основные проблемы с горелкой котла: отсутствие подачи топлива, недостаточная подача воздуха, неисправность системы розжига, отсутствие или неверное срабатывание датчиков пламени, срабатывание защит автоматики котла, низкое или нестабильное напряжение питания, недостаточная тяга в дымоходе, нарушение регламента розогрева котла, обратная тяга, слабая или слишком сильная тяга в газовом котле, ошибки в настройке горелки, механические неисправности горелочного оборудования или загрязнение горелки.

Ситуации, приводящие к неисправности горелки котла: работа горелки вне расчетных нагрузок, самовольная корректировка настроек персоналом, отсутствие регламентного технического обслуживания состояния газо- и воздухопроводов, неквалифицированная установка оборудования.

Безопасность работы таких установок обеспечивается при помощи постоянного контроля

наличия пламени в топке котла [1]. Одним из основных элементов системы безопасности является датчик, осуществляющий постоянный контроль наличия пламени. Для повышения надежности определения пламени, а, следовательно, для повышения надежности водогрейных котлов применяется система из нескольких датчиков, работающих на разных физических принципах.

При сжигании газа и жидкого топлива в топках котлов применяются различные методы контроля наличия пламени. К таким методам относятся ионизационный, термокондуктометрический, звуковой, фотоэлектрический, термометрический и многие другие. При разработке системы безопасности котла основное внимание нужно обратить на выбор датчиков и на правильность их установки – для обеспечения надежной работы.

В статье предложена система контроля пламени, в состав которой входят 4 датчика: оптический датчик на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), пирометрический, звуковой и газовый.

Структурная схема системы контроля пламени горелки представлена на рис. 1. На структурной схеме обозначены: МК – микроконтроллер, ПИ – панель индикации, ПУ – панель управления, УФ1 и УФ2 – усилители-формирователи, ПФ – полосовой фильтр, ММ – микрофон, П – пирометр, ЦК – цифровая камера, СФ1 и СФ2 – светофильтры.

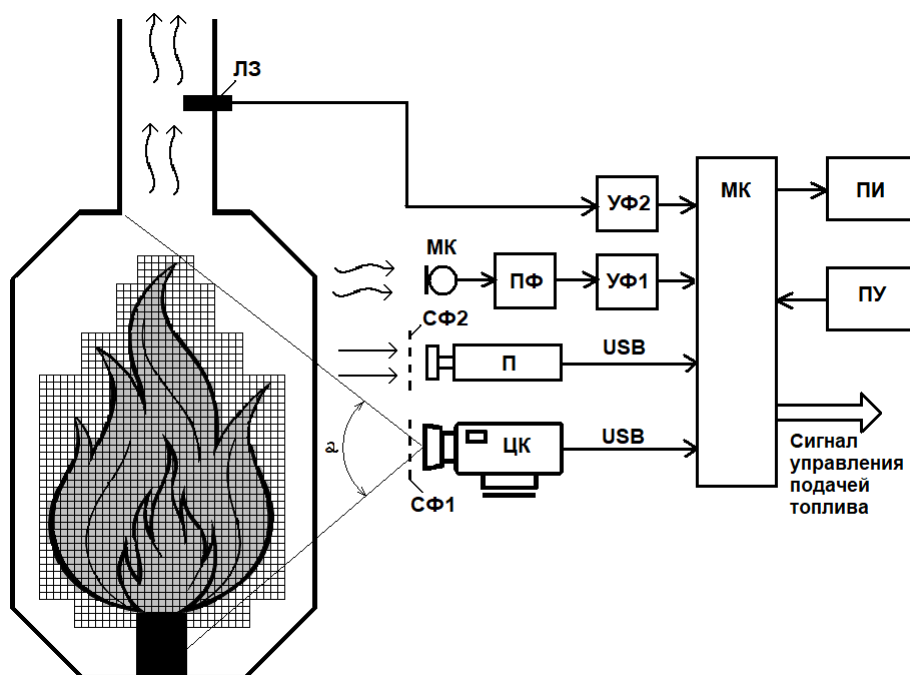


Рис. 1. Структурная схема системы контроля пламени горелки

Рассмотрим принципы работы датчиков системы контроля пламени горелки. В основе оптического датчика контроля пламени лежит ПЗС-матрица, которая часто применяется в обработке оптической информации в телевидении, в системах технического зрения роботов, оптико-электронных приборах контроля и распознавания [2; 3]. ПЗС-матрица осуществляет обработку двухкоординатного изображения, при этом происходит разложение двухкоординатного изображения на элементы. Многоэлементное накопление сигналов является важным свойством преобразователя, которое позволяет осуществлять выделение информационного сигнала из шума.

В ячейках ПЗС-матрицы происходит накопление сигналов и их усиление, что позволяет повысить отношение сигнал/шум [4]. При работе ПЗС-матрицы многоэлементное зарядовое изображение перемещается в кристалле с помощью бегущей волны напряжения. Процесс развертки завершается поэлементным переносом зарядовых пакетов в выходном регистре к считывающему устройству. В матрице осуществляется дискретизация изображения по времени, то есть пространственное изображение в матрице преобразуется в импульсный сигнал. Считывающее устройство измеряет накопленные заряды. Амплитуда выходного электрического сигнала не зависит от скорости считывания. Важнейшим достоинством многоэлементного твердотельного элемента является жесткость раstra, обусловленная топологией, при этом в жестком растре исключены искажения и нестабильность по времени [5; 6].

Амплитуда импульсного выходного сигнала

представлена в аналоговой форме, которая с помощью внутреннего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в цифровой сигнал, поступающий по шине USB на вход микроконтроллера МК. Линейность оптоэлектронного преобразования, жесткость раstra и стабильность во времени делают ПЗС-матрицу высокоточным измерителем распределения освещенности [6]. В твердотельных камерах можно регулировать частоту кадров, число строк, элементов в строке, время накопления и форму апертуры, что позволяет более точно перевести изображение в цифровую форму.

Для корректной работы цифровой камеры ЦК (рис. 1) перед ее объективом установлен светофильтр СФ1, пропускающий поток излучения пламени в видимом диапазоне спектра. При установке камеры угол приема изображения  $\alpha$  должен позволять произвести захват всего факела пламени. Выход камеры с помощью шины USB соединен с микроконтроллером МК, который управляет многократным измерением площади пламени по количеству пикселей изображения, и по результатам измерений вычисляет среднее значение площади неустойчивого изображения. Результат измерения площади изображения пламени может быть использован для автоматического управления режимом горелки.

Для работы в составе системы применена камера xiD с ПЗС матрицей фирмы XIMEA, содержащая датчики Sony EXview HAD CCD II (ICX674, ICX694, ICX814, ICX834) и с интерфейсом USB 3.0. Внешний вид камеры показан на рис. 2, а, вид пламени в камере сгорания показан на рис. 2, б.



а



б

Рис. 2. Камера xiD (а) и пламя в камере сгорания (б)

Режим работы горелки очевидно определяется не только площадью пламени, но и ее температурой, и поэтому контроль пламени необходимо осуществлять с помощью пирометра П [7; 8]. Перед объективом пирометра также установлен оптический фильтр СФ2, пропускающий поток излучения пламени в инфракрасном диапазоне спектра. Параметры пирометра выбираются так, чтобы зона измерения температуры была внутри контура изображения пламени. Выход пирометра соединен по шине USB с микроконтроллером МК. Для работы в составе системы может быть применен пирометр Optris CSmicro LT02 с диапазоном измерений температуры от  $-50$  до  $+1030$  °С, или ТЕТРОН-Т1500 с диапазоном измерений от  $-50$  до  $+1500$  °С. На рис. 3 показан внешний вид пирометра Optris CSmicro LT02.

Контроль работы горелки может быть осуществлен по звуку, издаваемому камерой сгорания в процессе работы [9]. Для этого был



Рис. 3. Пирометр Optris CSmicro LT02

применен микрофон МК типа Ария-ТС-МК-12 с диапазоном частот 30–16000 Гц. Поскольку диапазон звуков, издаваемых камерой сгорания, лежит в диапазоне 80–300 Гц, был использован полосовой фильтр ПФ. Между выходом полосового фильтра и входом микроконтроллера установлен усилитель-формирователь УФ1 для усиления и согласования сигналов по уровню. Осциллограмма звука горения топлива в камере сгорания топки котла показана на рис. 4.

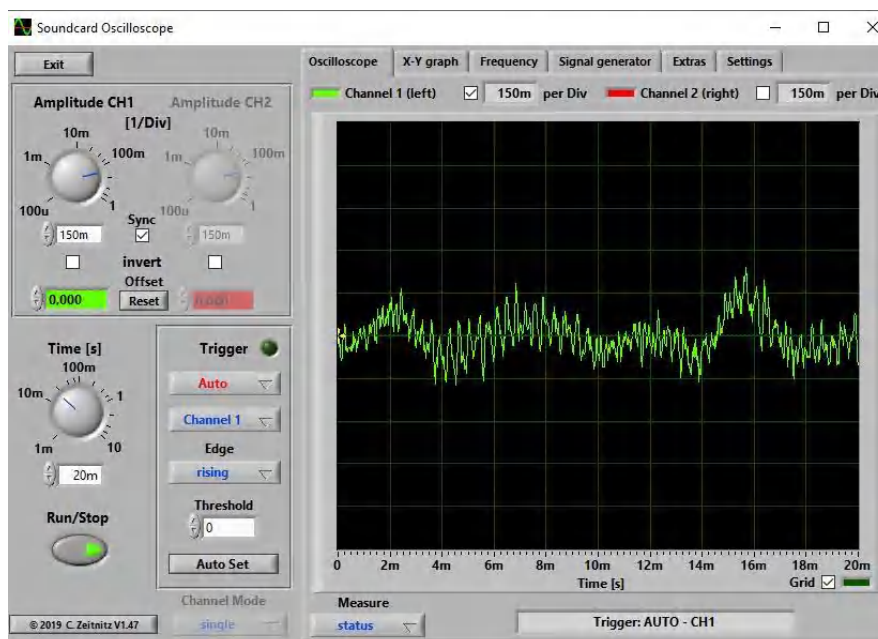


Рис. 4. Осциллограмма звука горения

Контроль работы горелки также осуществляется путем анализа состава газов, выходящих из камеры сгорания [10; 11]. Для контроля кислорода в составе газов применен газовый датчик – лямбда-зонд ЛЗ типа Arch (рис. 5), установленный в дымоходе. Лямбда-зонд контролирует содержание кислорода в дымовых газах, что позволяет обнаружить наличие пламени, а также имеется возможность оптимизировать процесс сжигания топлива и сократить его расход.



Рис. 5. Лямбда-зонд

Лямбда-зонд соединен с входом микроконтроллера через усилитель-формирователь УФ2, формирующий на выходе сигнал высокого уровня при наличии пламени, или низкого уровня при его отсутствии.

Принцип работы лямбда-зонда электрохимический, и заключается в возникновении потенциала между двумя электродами датчика, покрытыми пористым платиновым напылением. Между электродами находится твердый электролит в виде диоксида циркония ( $ZrO_2$ ). Разность потенциалов возникает при нагревании электролита, когда через него происходит движение ионов кислорода от атмосферного воздуха и дымовых газов. Напряжение, возникающее на электродах датчика, зависит от концентрации кислорода в отработавших дымовых газах.

Система обработки информации с датчиков построена на микроконтроллере МК типа PIC16F886 фирмы Microchip [11]. Для защиты от помех в микроконтроллере включен сторо-

жевой таймер WDT. Сигналы с четырех датчиков и от панели управления ПУ поступают на входы микроконтроллера, к выходу микроконтроллера подключена панель индикации ПИ. Панель индикации визуально отображает состояние датчиков пламени и сигнал управления подачей топлива в горелку котла.

Панель управления позволяет изменять приоритеты сигналов датчиков в зависимости от вида топлива и конструкции водогрейного котла. При наличии сигналов наличия пламени от трех датчиков их четырех, на панели индикации загорается световой сигнал «Работа». В случае, если два датчика фиксируют наличие пламени, а другие два датчика фиксируют отсутствие пламени, на панели индикации загорается световой сигнал «Стоп» и выдается сигнал на прекращение подачи топлива в горелку.

Блок-схема алгоритма программы микроконтроллера при опросе датчиков представлена на рис. 6.

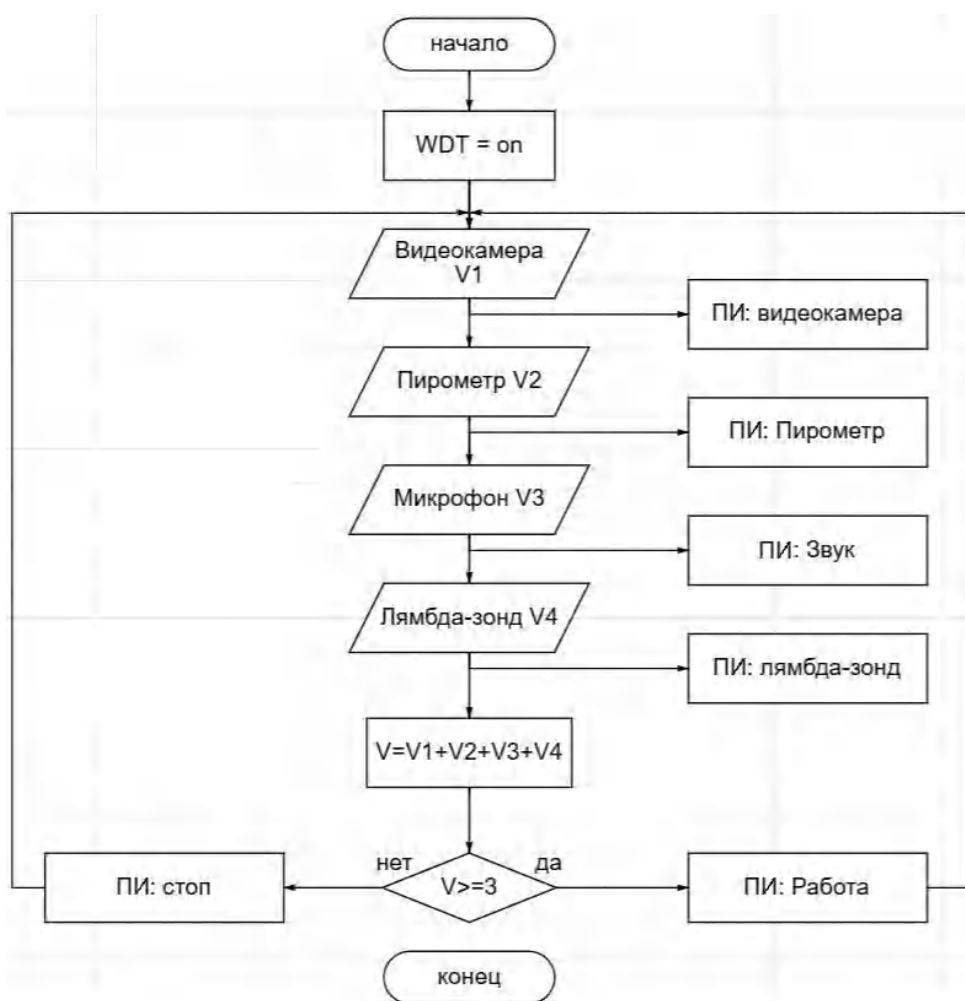


Рис. 6. Блок-схема алгоритма программы микроконтроллера

Разработанная система контроля пламени горелки, в состав которой входят четыре датчика пламени, основанных на разных физических принципах, позволяет надежно фиксировать наличие пламени в котельном оборудовании. Внедрение системы контроля пламени в промышленность позволит повысить безопасность эксплуатации котельного оборудования и существенно снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ EN 298-2015 «Автоматические системы контроля горения для горелок и аппаратов, сжигающих газообразное или жидкое топливо». Дата введения 2022–07–01.
- Ишанин, Г. Г. Приемники оптического излучения: учебник ; под ред. В. В. Коротаева / Г. Г. Ишанин, В. П. Челибанов. – СПб.: Лань, 2021. – 304 с.
- Пресс, Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью / Ф. П. Пресс. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
- El Gamal, A., Eltoukhy H. CMOS image sensors // IEEE Circuits and Devices Magazine. – 2005. – V. 21. – № 3. – P. 6–20.
- Theuwissen, A.J.P. CMOS image sensors: state-of-the-art // Solid-State Electronics. – 2008. – V. 52. – № 9. – P. 1401–1406.
- Massey, R., Stoughton C., Leauthaud A. et al. Pixel-based correction for charge transfer inefficiency in the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2010. – V. 401. – № 1. – P. 371–384.
- Коноваленко, А. А. Фотодатчики пламени для котлов / А. А. Коноваленко, А. И. Нефедьев // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук : материалы V междунар. науч.-практ. конф. (школы-семинара) молодых ученых (г. Тольятти, 22–24 апреля 2019 г.) / ФГБОУ ВПО «Тольяттинский гос. ун-т». – Тольятти, 2019. – С. 402–405.
- Коноваленко, А. А. Оптодатчики пламени для котлов / А. А. Коноваленко, А. И. Нефедьев // Форум молодых ученых : электронный научный журнал. – 2018. – № 12 (28). – 6 с. – URL: [https://forum-nauka.ru/domains\\_data/files/28/Konovalenko,%20Nefedev%20\\_\\_\\_VolgGTU.pdf](https://forum-nauka.ru/domains_data/files/28/Konovalenko,%20Nefedev%20___VolgGTU.pdf). – Текст: электронный.
- Патент РФ на полезную модель №220403, МПК F23N 5/00 Датчик контроля наличия пламени / А. И. Нефедьев, Л. А. Нефедьева, А. А. Коноваленко; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2023.
- Виглеб, Г. Датчики : Устройство и применение / Г. Виглеб; перевод с нем. М. А. Хацернова. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
- PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet (URL: <https://oskolchip.ru/datasheet/PIC16F886.pdf?ysclid=moeil8qntk623901489>). Дата обращения 04.05.2026).

## REFERENCES

- GOST EN 298-2015 "Automatic combustion control systems for burners and apparatus burning gaseous or liquid fuels". Effective date 2022-07-01.
- Ishinin, G.G., Chelibanov V.P. Optical Radiation Receivers: Textbook / Ed. by V.V. Korotaev. St. Petersburg: Lan, 2021. 304 p.
- Press, F.P. Photosensitive Charge-Coupled Devices. Moscow: Radio i Svyaz, 1991. 264 p.
- El Gamal, A., Eltoukhy H. CMOS image sensors // IEEE Circuits and Devices Magazine. 2005. V. 21. No. 3. pp. 6–20.
- Theuwissen, A.J.P. CMOS image sensors: state-of-the-art // Solid-State Electronics. 2008. Vol. 52. No. 9. Pp. 1401–1406.
- Massey, R., Stoughton C., Leauthaud A. et al. Pixel-based correction for charge transfer inefficiency in the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2010. Vol. 401. No. 1. Pp. 371–384.
- Konovalenko, A.A. Flame photosensors for boilers / A.A. Konovalenko, A.I. Nefed'ev // Applied Mathematics and Computer Science: Modern Research in the Field of Natural and Technical Sciences: Proc. of the 5th International Scientific and Practical Conf. (School-seminar) of young scientists (Tolyatti, April 22-24, 2019) / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Tolyatti State University". - Tolyatti, 2019. - Pp. 402-405.
- Konovalenko, A.A. Flame Optosensors for Boilers [Electronic resource] / A.A. Konovalenko, A.I. Nefed'ev // Forum of Young Scientists: Electronic Scientific Journal. - 2018. - No. 12 (28). - 6 p. - Access mode: [https://forum-nauka.ru/domains\\_data/files/28/Konovalenko,%20Nefedev%20\\_\\_\\_VolgGTU.pdf](https://forum-nauka.ru/domains_data/files/28/Konovalenko,%20Nefedev%20___VolgGTU.pdf).
- Russian Federation Patent for Utility Model No. 220403, IPC F23N 5/00 Flame Monitoring Sensor / A.I. Nefed'ev, L.A. Nefed'eva, A.A. Konovalenko; Volgograd State Technical University. - 2023.
- Vigleb, Gerhard. Sensors: Design and Application / G. Vigleb; Translation from German by M.A. Khatsernova. - Moscow: Mir, 1989. - 196 p.
- PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet (URL: <https://oskolchip.ru/datasheet/PIC16F886.pdf?ysclid=moeil8qntk623901489>). Accessed on 04.05.2026).

Статья поступила в редакцию 29.04.2026, доработана 13.05.2026, подписана в печать 15.05.2026

The article was submitted 29.04.2026, revised 13.05.2026, accepted for publication 15.05.2026

УДК 628.9.03, 621.373.826  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-24-27

Научная статья  
Original article

*З. А. Денисов, В. Н. Храмов*

**ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ  
ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия**

✉ Владимир Николаевич Храмов, vladimir.khramov@volsu.ru

**Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению шероховатости поверхности оптических деталей бесконтактным оптическим методом. Для экспресс-диагностики шероховатости использованы измерения максимального коэффициента отражения низкоинтенсивного лазерного излучения от таких поверхностей при заданном угле падения. Получена практически линейная зависимость такого коэффициента от величины шероховатости поверхности в диапазоне 0,05–2,5 мкм.

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, лазеры, зеркальное и диффузное отражение, оптические детали

**Для цитирования:** Денисов З. А., Храмов В. Н. Оценка величины шероховатости поверхности по измерению коэффициентов диффузного отражения лазерного излучения. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 24–27. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-24-27.

**Информация об авторах:**

**Захар Александрович Денисов** – аспирант кафедры «Теоретическая физика и волновые процессы» Волгоградского государственного университета

e-mail: zakhar-denisov@mail.ru

**Владимир Николаевич Храмов** – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Радиофизика» Волгоградского государственного университета

<https://orcid.org/0000-0001-8988-0929>

scopus id: 7005710281

e-mail: vladimir.khramov@volsu.ru

**Вклад авторов:**

**З. А. Денисов** – подготовка образцов, проведение измерений, участие в обсуждении результатов.

**В. Н. Храмов** – определение цели работы, анализ экспериментов, написание текста статьи.

*Z. A. Denisov, V. N. Khramov*

**THE ESTIMATION OF SURFACE ROUGHNESS BY MEASURING  
DIFFUSE REFLECTION COEFFICIENTS OF LASER RADIATION**

**Volgograd State University, Volgograd, Russia**

✉ Vladimir N. Khramov, vladimir.khramov@volsu.ru

**Abstract.** This article presents the results of experimental studies on determining the surface roughness of optical components using a contactless optical method. Rapid roughness diagnostics were performed using measurements of the maximum reflectivity of low-intensity laser radiation from such surfaces at a given incidence angle. A nearly linear relationship between this reflectivity and surface roughness was found in the range of 0,05–2,5  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** surface roughness, lasers, specular and diffuse reflection, optical components

**For citation:** Denisov Z. A., V. N. Khramov V. N. The estimation of surface roughness by measuring diffuse reflection coefficients of laser radiation. Energo- i resursosberezhenie: promyshlenost' i transport. 2026; 2(55): 24–27. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-24-27.

**Information about the authors:**

**Zakhar A. Denisov** – Postgraduate student of the Department of Theoretical Physics and Wave Processes Volgograd State University

e-mail: zakhar-denisov@mail.ru

**Vladimir N. Khramov** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radiophysics Volgograd State University

<https://orcid.org/0000-0001-8988-0929>

scopus id: 7005710281

e-mail: vladimir.khramov@volsu.ru

**Contribution of the authors:**

**Zakhar. A. Denisov** – preparation of samples, carrying out measurements, participation in the discussion of the results.

**Vladimir. N. Khramov** – definition of the purpose of the work, analysis of experiments, writing the text of the article.

Шероховатость поверхности является чрезвычайно важной величиной как в машиностроении, так и в оптическом приборостроении. В машиностроении она в значительной степени определяет основные эксплуатационные свойства деталей и узлов – износостойкость, сопротивление усталости, надежность посадок, контактную жесткость и теплопроводность стыков сопряженных деталей, коррозионную стойкость, герметичность соединений. В оптическом приборостроении шероховатость определяет отражающую и поглощающую способность поверхностей, точность и качество изготовления оптических деталей. Поэтому характеристики шероховатости поверхности строго нормируются и подвергаются постоянному анализу в технологических исследованиях и контролю в процессе производства.

Основные параметры шероховатости определены в соответствующих ГОСТах [1; 2]. Чаще используют параметр  $R_a$  – среднее арифметическое значение отклонения профиля. Но в оптическом приборостроении больше распространено использование параметра  $R_z$  – высота неровностей профиля (в мкм) по десяти точкам [3].

При изготовлении деталей в чертежах указывается номинальная шероховатость, которая, тем не менее, не может быть достигнута со стопроцентной вероятностью, что накладывает необходимость контроля этого параметра. Для этого используются различные методы – контактные с использованием профилометров и бесконтактные, в том числе и оптические [4]. Все эти методы требуют применения специального, зачастую дорогостоящего, оборудования.

При проведении измерений коэффициентов отражения лазерного излучения от полированных и шлифованных поверхностей оптических деталей нами вначале были отмечены некоторые предварительные закономерности. В зависимости от угла падения излучения свет рассеивается неровностями в большей или меньшей степени, что позволяет наблюдать изменение коэффициентов отражения. При разной высоте неровностей отражение также изменяется, что и позволило в дальнейшем провести оценку шероховатости. Таким образом, целью данной работы является реализация и апробация лазерной экспериментальной установки по

бесконтактному количественному определению величины шероховатости оптических поверхностей.

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из двух соосных лимбов. Первый лимб служил для задания угла падения  $\varphi_0$  на стеклянную пластину (2) с заданной шероховатостью. В качестве источника излучения использовался непрерывный полупроводниковый лазер (1) на длине волны 650 нм, мощностью 5 мВт и напряжением питания 3 В. Вторым лимбом с фотоприемником служил для измерения коэффициента отражения в виде диаграммы направленности в плоскости падения в зависимости от угла зеркально-диффузного отражения  $\varphi_1$ .

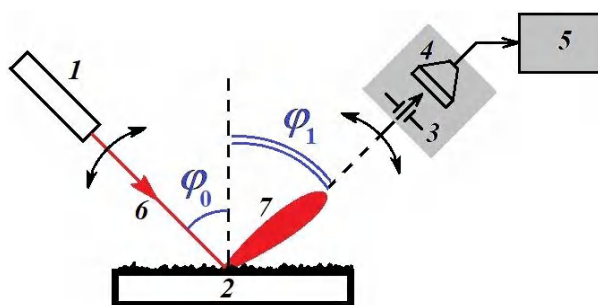


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – полупроводниковый лазер; 2 – стеклянная пластина с заданной шероховатостью; 3 – диафрагма; 4 – фотодиод; 5 – измерительный блок; 6 – падающий луч; 7 – рассеянное излучение

В качестве детектора излучения использовался измеритель мощности IMLIS-B4 (5). Входящий в его состав фотодиод ФД-24К (4) был вынесен отдельно и располагался на измерительном лимбе. Для ограничения измеряемого телесного угла была применена дополнительная диафрагма (3) диаметром 1,2 мм.

Для проверки работоспособности установки использовался стандартный светофильтр УФС-1. Его большое поглощение в видимой области спектра дает возможность использовать только одну полированную поверхность, что влияет на точность измерений. Проверка проводилась для двух состояний поляризации лазерного излучения: *p*-поляризация (в плоскости падения) и *s*-поляризация (перпендикулярно плоскости падения). Результаты эксперимента и расчета по формулам Френеля [5] по заданному показателю преломления ( $n = 1,54$ ) представлены на

рис. 2. Из графиков видно, что для обеих поляризаций экспериментальные и расчетные зависимости достаточно хорошо совпадают, что позволяет использовать данную установку для дальнейших исследований. Из-за наличия угла Брюстера ( $57^\circ$ ) в зависимости коэффициента

отражения для  $p$ -поляризации и ее немонотонности все последующие эксперименты проводились только при  $s$ -поляризации падающего излучения лазера, для которой френелевское (зеркальное) отражение монотонно увеличивается с ростом угла падения.

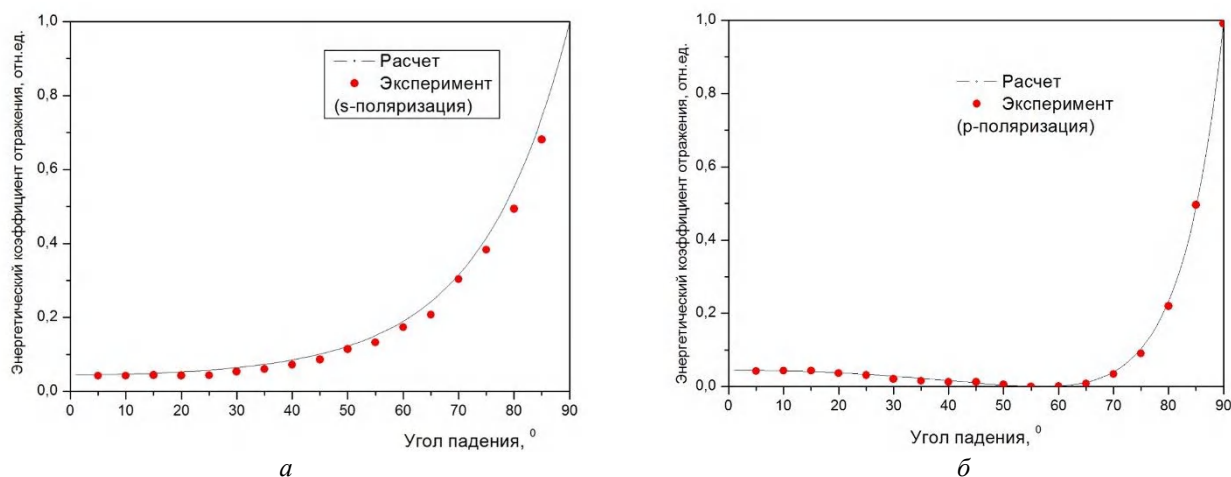


Рис. 2. Зависимости энергетических коэффициентов отражения от угла падения на поверхность светофильтра УФС-1 для  $s$ - поляризованного (а) и  $p$ -поляризованного (б) лазерного излучения

При исследовании использовались пять стеклянных образцов с различной шероховатостью. Один образец был эталонный, с заданной шероховатостью  $R_z = 2,5$  мкм. Для проверки всех образцов, включая эталонный, были проведены прямые измерения шероховатости с помощью микроскопа в соответствии с ГОСТ. У эталонного образца измеренный коэффициент шероховатости  $R_z = 2,52$  мкм, что хорошо совпадает с заявленным. Остальные образцы имели шероховатости  $R_z$ : 1,7; 1,34; 3,73; 5,52 (мкм).

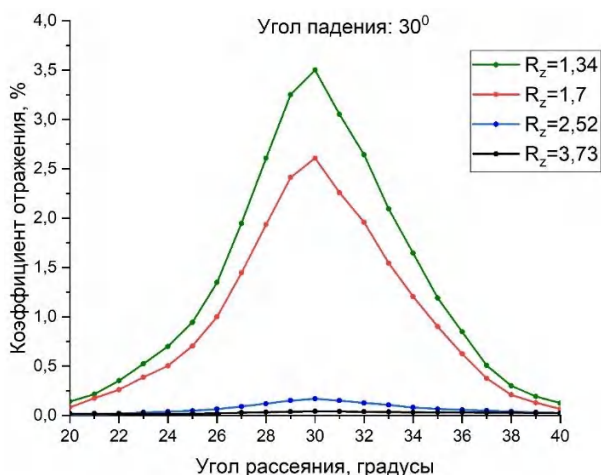


Рис. 3. Зависимости энергетических коэффициентов зеркально-диффузного отражения для образцов с различной шероховатостью при угле падения  $30^\circ$

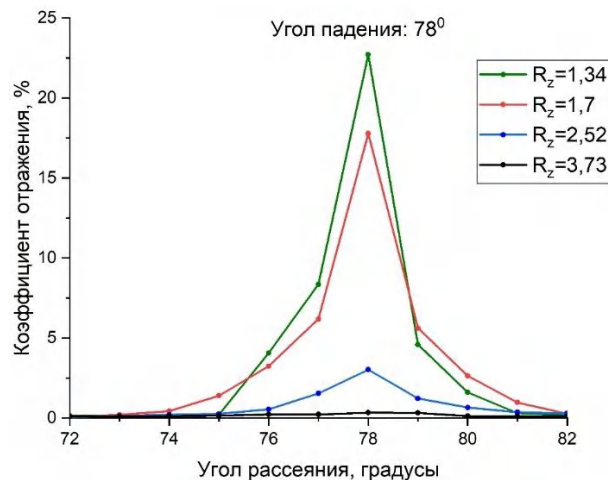


Рис. 4. Зависимости энергетических коэффициентов зеркально-диффузного отражения для образцов с различной шероховатостью при угле падения  $78^\circ$

На рис. 3 и 4 показаны зависимости коэффициентов зеркально-диффузного отражения в области угла зеркального отражения ( $30^\circ$  и  $78^\circ$  соответственно). Видно, что с ростом шероховатости зеркальная компонента отражения уменьшается. При  $R_z > 3,73$  измеряемые значения уже были сравнимы с погрешностью прибора.

По результатам измерений, указанных на рис. 3 и 4, были построены зависимости коэффициентов отражения в максимумах зависимостей зеркально-диффузного отражения от ко-

эффицентов шероховатости  $R_z$  при углах падения  $30^\circ$  и  $78^\circ$  (рис. 5).

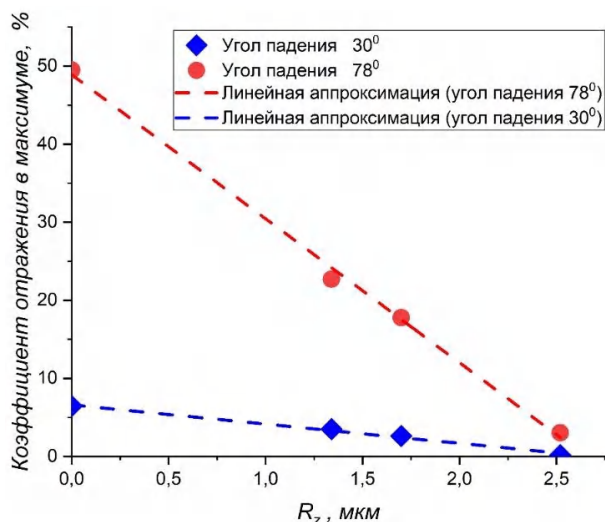


Рис. 5. Зависимости коэффициентов отражения в максимуме зависимостей зеркально-диффузного отражения от коэффициентов шероховатости  $R_z$  при двух углах падения

За «нулевое» значение коэффициента отражения взято расчетное значение френелевского коэффициента отражения при данном угле падения и показателе преломления материала. Обычно это соответствует полированной поверхности ( $R_z = 0,05$  мкм) [3]. Из графиков видно, что в диапазоне шероховатостей до  $R_z = 2,5$  мкм зависимость ведет себя практически линейно. Линейная аппроксимация указана пунктирной линией. Причем линейность остается как при малых углах падения, так и при больших. Отметим, что измерения по промежуточным углам падения показали аналогичные результаты. Дальнейшее возрастание шероховатостей приводит в большом относительном погрешностям при использовании данного измерителя мощности. Применение большого угла падения (в данном случае  $78^\circ$ ) оказалось предпочтительнее, так как при этом относительная погрешность – около 3,5 %, а при  $30^\circ$  – более 6 %.

Конечно, данный метод был опробован только на оптических поверхностях с различной малой шероховатостью. Диапазон шероховатостей ( $R_z = 0,05$ – $2,5$  мкм) как раз попадает в самый распространенный диапазон шероховатостей типовых оптических деталей (от полированных до шлифованных). Важно помнить, что используемый нами оптический метод является довольно грубым способом оценки, основывающимся на сравнении зависимостей коэффициента отражения от угла падения излучения на исследуемую поверхность с эталонными. Такой метод не может заменить традиционные стандартные методы, а может являться только простым экспресс-методом. Тем не менее, он может быть применим и для слабошероховатых поверхностей других материалов с предварительной калибровкой на эталонах.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики = Surface roughness. Parameters and characteristics : государственный стандарт Союза ССР : взамен ГОСТ 2789-59 : введен с 01.01.1975 / Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – Переизд. (сент. 1990 г.) с Изм. № 1, утв. в мае 1980 г. (ИУС 7-80). – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 10 с.
- ГОСТ Р 71448-2024. Оптика и фотоника. Шероховатость поверхности. Параметры и типы направлений неровностей поверхности = Optics and photonics. Surface roughness. Parameters and types of directions of surface irregularities: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2025. – 12 с.
- Латыев, С. М. Конструирование точных (оптических) приборов / С. М. Латыев. – СПб.: Политехника, 2007. – 579 с.
- Способы и методы измерения шероховатости поверхности. – URL: [http://www.xn--80aggyh2a5bzb.xn--p1ai/info/articles/Izmerenie\\_sherohovostii.htm](http://www.xn--80aggyh2a5bzb.xn--p1ai/info/articles/Izmerenie_sherohovostii.htm) (Дата обращения 13.01.2026). – Текст электронный.
- Калитеевский, Н. И. Волновая оптика: учебное пособие для вузов / Н. И. Калитеевский. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1995. – 463 с.

#### REFERENCES

- GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters and characteristics : State standard of the USSR : replacing GOST 2789-59 : introduced on 01.01.1975 / USSR State Committee for Product Quality Management and Standards. – Reprint. (Sept. 1990) with Revision No. 1, approved in May 1980 (IUS 7-80). – Moscow : Publishing House of Standards, 1990. – 10 p.
- GOST R 71448-2024. Optics and photonics. Surface roughness. Parameters and types of directions of surface irregularities: National standard of the Russian Federation: official publication / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. – Moscow: Federal State Budgetary Institution "Institute of Standardization", 2025. – 12 p.
- Latyev, S. M. Designing of precision (optical) instruments. St. Petersburg: Politechnika Publ., 2007. 579 p.
- Ways and methods of measuring surface roughness [Electronic resource]. – Access mode: [http://www.xn--80aggyh2a5bzb.xn--p1ai/info/articles/Izmerenie\\_sherohovostii.htm](http://www.xn--80aggyh2a5bzb.xn--p1ai/info/articles/Izmerenie_sherohovostii.htm) (Accessed 13.01.2026)
- Kaliteevsky, N. I. Wave optics: A textbook for universities. 3rd ed., Moscow: Higher School, 1995. 463 p.

УДК 531.768:004.93  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-28-37

Научная статья  
Original article

*В. И. Конченков<sup>1, 2</sup>, А. В. Сомов<sup>1</sup>, П. С. Тарасов<sup>1</sup>, Г. А. Шишкин<sup>1</sup>*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ  
ПО ДАННЫМ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА**

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

<sup>2</sup> **Волгоградский государственный социально-педагогический университет,  
Волгоград, Россия**

✉ Глеб Андреевич Шишкин, gl.shishkin2017@yandex.ru

**Аннотация.** В статье представлена разработка микропроцессорной системы для классификации типов физической активности человека на основе анализа данных акселерометра, обеспечивающей достоверное распознавание приседаний, ходьбы и бега по данным вертикальной проекции ускорения. Актуальность работы обусловлена потребностью в компактных носимых устройствах, способных в реальном времени контролировать двигательную активность человека во время занятия спортом, в ходе медицинской реабилитации и при работе в опасных условиях.

Алгоритм распознавания типа движения основан на анализе отрицательных пиков ускорения по оси Y и временных интервалов между ними. Приведены результаты экспериментальной проверки работоспособности устройства. Передача данных с носимого устройства осуществляется по Bluetooth.

**Ключевые слова:** микроконтроллер, STM32, МЭМС-акселерометр, определение типа физической активности, алгоритм, носимые устройства, цифровая обработка сигналов, система

**Для цитирования:** Конченков В. И., Сомов А. В., Тарасов П. С., Шишкин Г. А. Определение типа двигательной активности по данным МЭМС-акселерометра. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 28-37. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-28-37.

**Информация об авторах**

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

Scopus: 35105284600

e-mail: kontchenkov@yandex.ru

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

e-mail: direktor7033@mail.ru

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

Scopus: 57195641522

e-mail: tarasradio@mail.ru

**Глеб Андреевич Шишкин** – магистрант кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы» ВолгГТУ

e-mail: gl.shishkin2017@yandex.ru

**Вклад авторов:**

**В. И. Конченков** – определение цели работы, анализ полученных данных.

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

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

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

*V. I. Konchenkov<sup>1, 2</sup>, A. V. Somov<sup>1</sup>, P. S. Tarasov<sup>1</sup>, G. A. Shishkin<sup>1</sup>*

**DETERMINATION OF THE TYPE OF MOTOR ACTIVITY  
ACCORDING TO MEMS-ACCELEROMETER DATA**

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

<sup>2</sup> **Volgograd State Socio-Pedagogical University, Volgograd, Russia**

✉ Gleb A. Shishkin, gl.shishkin2017@yandex.ru

**Abstract.** The article presents the development of a microprocessor system for classifying human physical activity types based on the analysis of accelerometer data, which provides reliable recognition of squats, walking and running based on vertical acceleration projection data. The relevance of the work is due to the need for compact wearable devices capable of monitoring human motor activity in real time during sports, during medical rehabilitation and when working in dangerous conditions.

The motion type recognition algorithm is based on the analysis of negative acceleration peaks along the Y axis and the time intervals between them. The results of an experimental verification of the device's operability are presented. Data transfer from a wearable device is carried out via Bluetooth.

**Keywords:** microcontroller, STM32, MEMS-accelerometer, determination of the type of physical activity, algorithm, wearable devices, digital signal processing, system

**For citation:** Konchenkov V. I., Somov A. V., Tarasov P. S., Shishkin G. A. Determination of the type of motor activity according to MEMS-accelerometer data. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 2(55): 28–37. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-28-37.

**Information about the authors:**

**Vladimir I. Konchenkov** – Ph.D., Associate Professor of the Department of "Electronic Computational Machines and Systems" VSTU

Scopus: 35105284600

e-mail: kontchenkov@yandex.ru

**Alexander V. Somov** – Ph.D in Pedagogic Sciences, Associate Professor of the Department of "Electrical Engineering" VSTU

e-mail: direktor7033@mail.ru

**Pavel S. Tarasov** – Senior Lecturer of the Department of "Electronic Computational Machines and Systems" VSTU

Scopus: 57195641522

e-mail: tarasradio@mail.ru

**Gleb A. Shishkin** – Master's student of the Department of "Electronic Computers and Systems" VSTU

e-mail: gl.shishkin2017@yandex.ru

**Contribution of the authors:**

**Vladimir I. Konchenkov** – definition of the purpose of the work, analysis of the data obtained.

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

**Pavel S. Tarasov** – calculations, editing the text of the article.

**Gleb A. Shishkin** – research, writing the text of the article.

**Введение**

В современном мире мониторинг физической активности человека важен в спорте [1], наблюдении за пожилыми людьми [2; 3], восстановлении после травм [4; 5], фитнесе [6] и обеспечении безопасности в опасных условиях [7; 8]. Носимые устройства позволяют, например, фиксировать падение и автоматически оповещать о необходимости помощи.

Развитие микроэлектроники позволило создавать компактные системы на базе микроконтроллеров и инерциальных датчиков, в частности акселерометров, которые благодаря малым размерам и низкому энергопотреблению пригодны для длительного сбора биомеханических данных. Ключевой проблемой остается разработка алгоритмов надежной классификации типов активности по ограниченному набору сигналов.

Цель работы – разработка микропроцессорной системы на основе микроконтроллера STM32 и МЭМС-акселерометра для определения в реальном времени видов активности (приседания, ходьба, бег) по данным вертикального ускорения.

Для достижения цели необходимо решить задачи:

1) подобрать компоненты и изготовить прототип;

2) разработать алгоритм выделения признаков движений из сигналов акселерометра;

3) реализовать ПО микроконтроллера в STM32CubeIDE (HAL) для сбора, обработки и классификации данных;

4) обеспечить передачу результатов по Bluetooth для визуализации;

5) провести экспериментальную проверку системы при различных режимах активности.

**Разработка аппаратной части**

На рис. 1 представлена принципиальная схема разработанной микропроцессорной системы [9], включающей модуль питания, акселерометр MPU9250, микроконтроллер STM32-F401CCU6 на плате GreenPill и Bluetooth HC-06. Модуль питания на базе Li-Ion аккумулятора 18650 обеспечивает зарядку и преобразование напряжения до 3.3 В для всех компонентов. Акселерометр по интерфейсу I<sup>2</sup>C передает данные о трехосевом ускорении на микроконтроллер, который обрабатывает сигналы и отправляет результат классификации активности через Bluetooth-модуль.

**Разработка программы для микроконтроллера**

Программа для микроконтроллера разработана с использованием библиотеки HAL в среде STM32CubeIDE. Общий алгоритм работы системы представлен на рис. 2. В начале выполнения инициализируются встроенные модули I<sup>2</sup>C и UART, таймер и акселерометр MPU9250. Далее по прерываниям от таймера производится

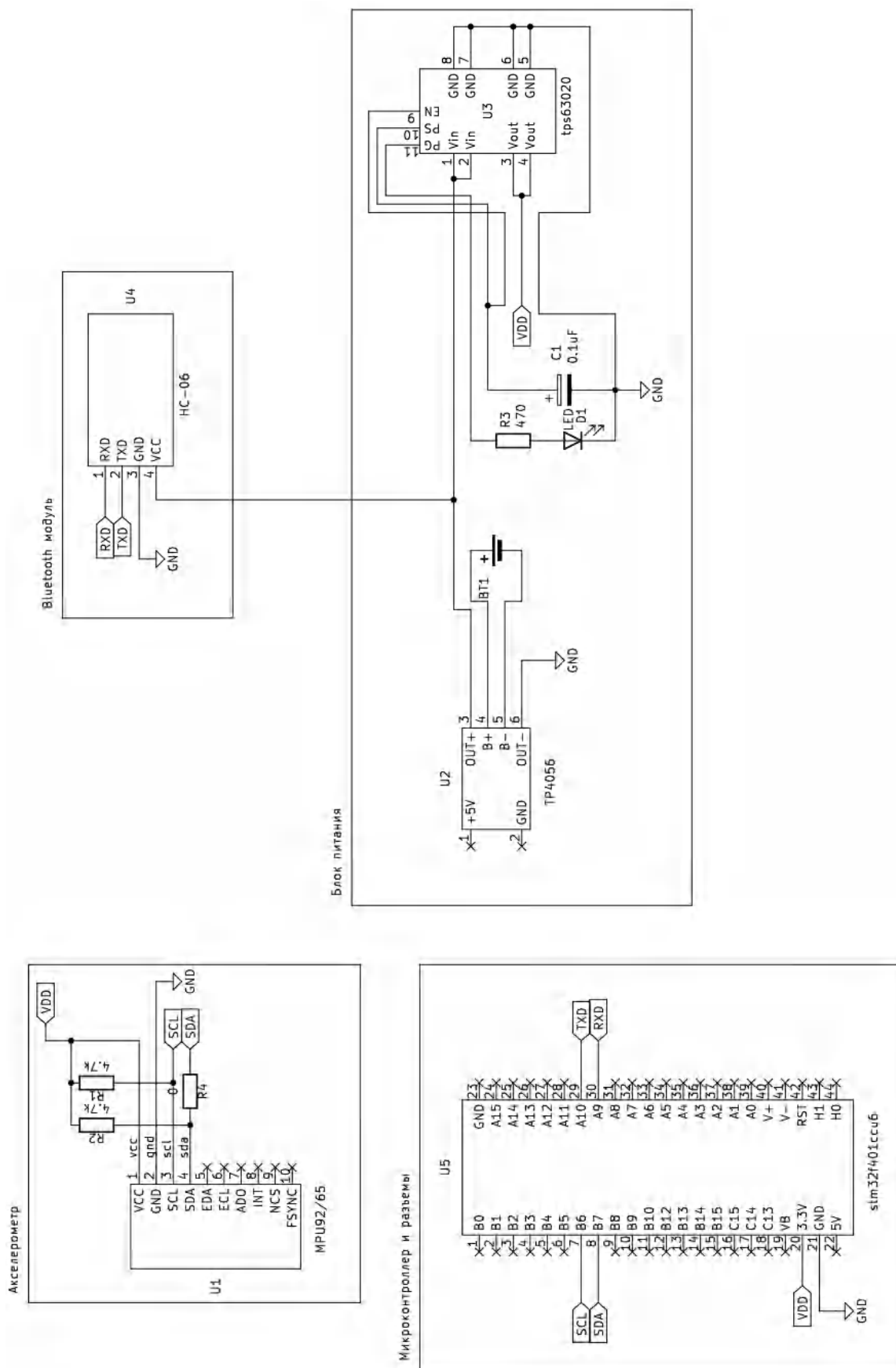


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства

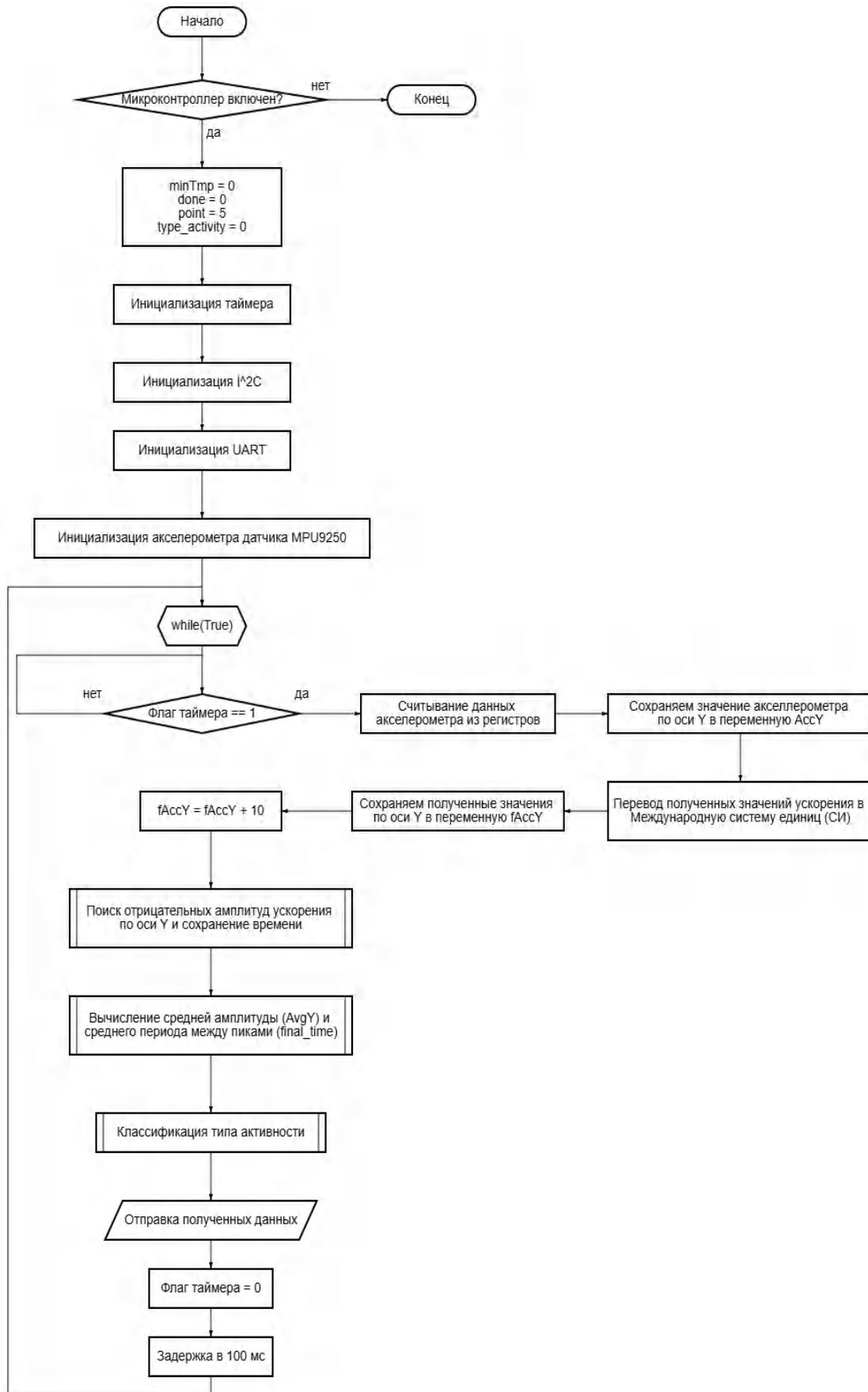


Рис. 2. Схема алгоритма работы программы для микроконтроллера

периодическое считывание значений ускорения из регистров акселерометра [10], их преобразование в единицы СИ и коррекция по оси Y (добавление  $10 \text{ м/с}^2$  для удобства расчетов).

В дальнейшем программа определяет максимальное по абсолютной величине отрицательное значение проекции ускорения на ось Y (пик) и период между такими пиками. При поступлении нового значения вертикального ускорения программа отслеживает его уменьшение ниже нуля и фиксирует минимальное значение (отрицательный пик) с сохранением временной метки. Для повышения устойчивости к шумам амплитуды и интервалы между соседними пиками усредняются методом скользящего среднего по последним пяти измерениям [11; 12]. Таким образом, формируются два ключевых параметра: средний период между пиками  $\text{final\_time}$  и среднее значение пиков  $\text{AvgYf}$ . На основе полученных параметров программа относит текущее движение к одному из четырех классов. Приседание идентифицируется по периоду  $0,9\text{--}2,8 \text{ с}$  и амплитуде  $\leq -4,0 \text{ м/с}^2$ . Ходьба характеризуется периодом  $0,45\text{--}0,8 \text{ с}$  и амплитудой от  $-3,8$  до  $-0,2 \text{ м/с}^2$ . Бег соответствует периоду  $0,25\text{--}0,42 \text{ с}$  и амплитуде  $\leq -5,0 \text{ м/с}^2$ . Указанные значения подбирались на основе экспериментов. Если параметры не попадают ни в один из заданных диапазонов (статика, переходные процессы), активность помечается как неопределенная. Результат классификации (числовой код типа активности) передается по Bluetooth, после чего выдерживается пауза  $100 \text{ мс}$  до начала следующего цикла измерений.

#### Экспериментальное исследование

Задачей экспериментального исследования являлось подтверждение работоспособности алгоритма классификации физической активности на основе двух параметров: отрицательных пиков вертикального ускорения и периода между ними.

Носимое устройство с инерциальным датчиком располагалось на груди испытуемого (рис. 3). Данное положение, определенное экспериментальным путем, обеспечивает наиболее четкую регистрацию пиков по оси Y.

В ходе экспериментов исследовались три типа активности:

- 1) приседание;
- 2) ходьба;
- 3) бег.

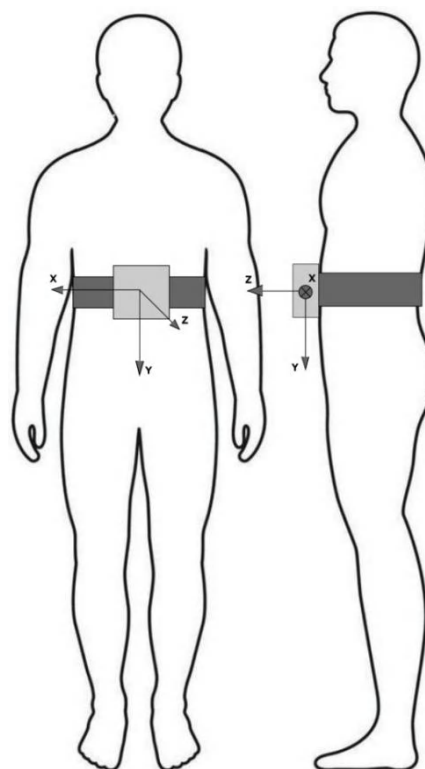


Рис. 3. Схема крепления носимого устройства на теле человека

Рассмотрим полученные графики в ходе проведенных опытов во время различных двигательных активностях. Во время приседания с акселерометра были получены значения по оси Y, изображенные на рис. 4 на графике  $\text{AccY}$ . Для дальнейшего расчета типа активности были вычислены усредненные максимальные отрицательные значения проекции ускорения на ось Y (пики), которые можно увидеть на графике  $\text{PeakY}$  на рис. 4.

На рис. 5 изображены следующие графики:  $\text{Periods}$  – график рассчитанных периодов между отрицательными пиками и уже рассмотренный ранее график  $\text{PeakY}$ . С помощью значений графиков  $\text{PeakY}$  и  $\text{Periods}$  происходит классификация типа активности и вычисленный тип активности выводится на графике  $\text{TypeActivity}$ . На рис. 5 видно, что  $\text{TypeActivity}$  равен 1, что соответствует приседанию.

Для типа активности «бег» были проведены два опыта, полученные во время быстрого бега (рис. 6) и медленного бега (рис. 7).

На рис. 6 и 7 выводятся найденные периоды между пиками ( $\text{Periods}$ ) и усредненные максимальные отрицательные значения ускорения ( $\text{PeakY}$ ). Также на рис. 6 и 7 изображен график  $\text{TypeActivity}$ . По нему видно, что он больше

время принимает значение 3, что соответствует типу активности «бег». Следовательно, программа на микроконтроллере определяет как медленный бег, так и быстрый.

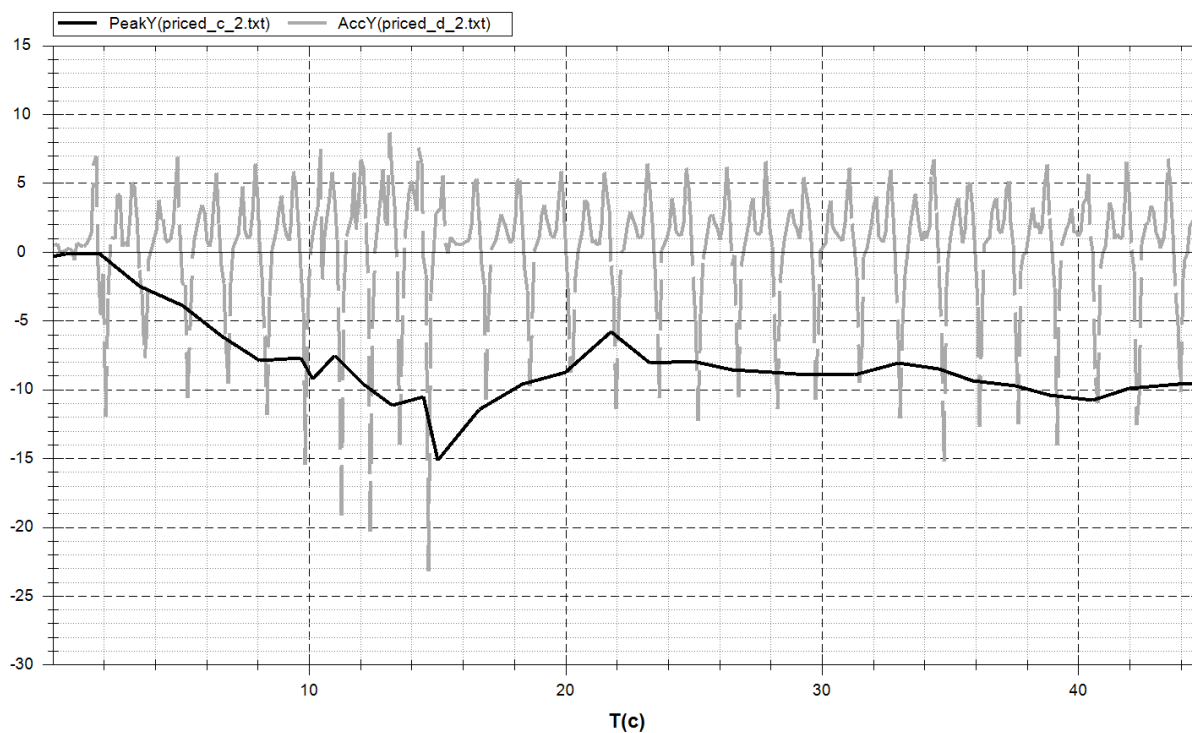


Рис. 4. Графики ускорения по оси Y и усредненные значения пиков, полученные во время приседания

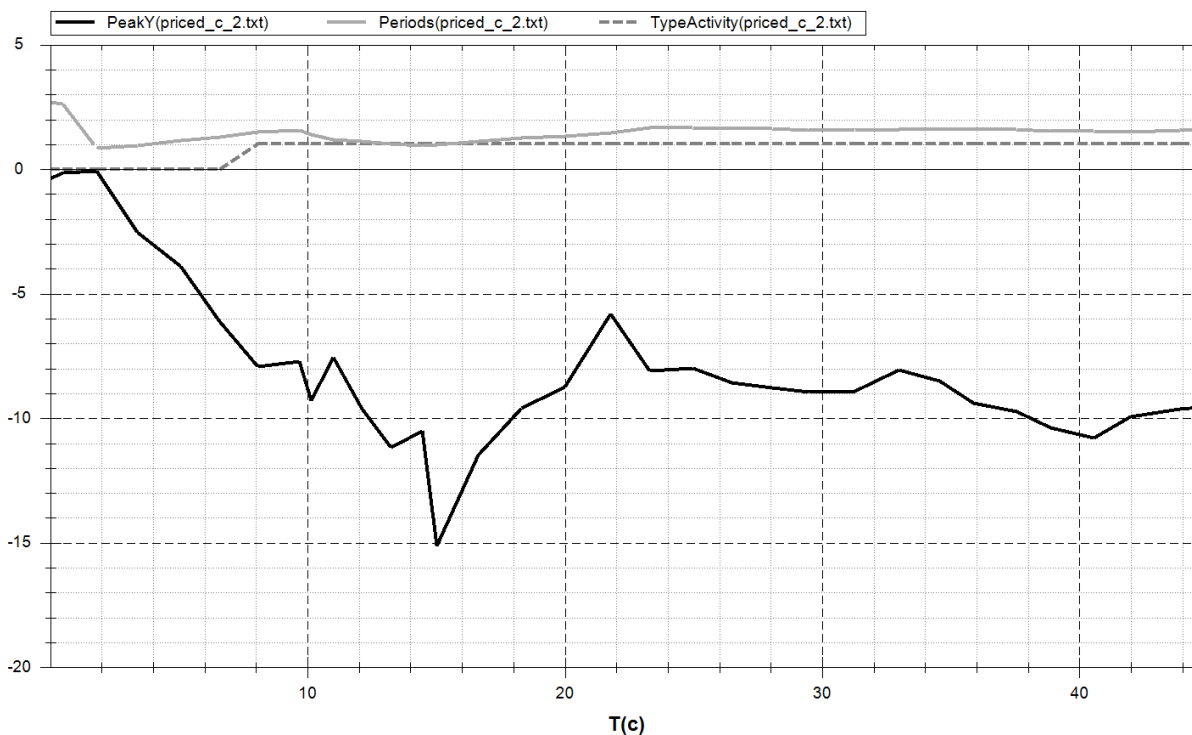


Рис. 5. Графики с усредненными значениями пиков, периодами между пиками и рассчитанным типом активности, полученные во время приседания

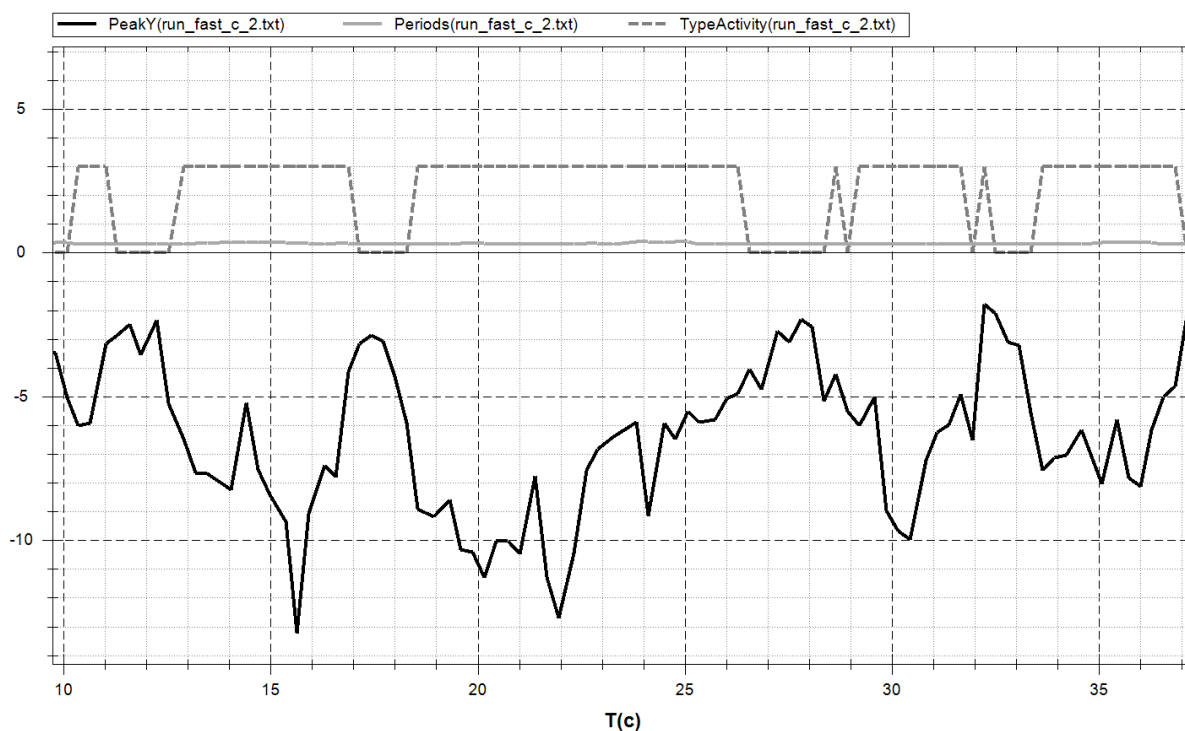


Рис. 6. Графики с усредненными значениями пиков, периодами между пиками и рассчитанным типом активности, полученные во время быстрого бега

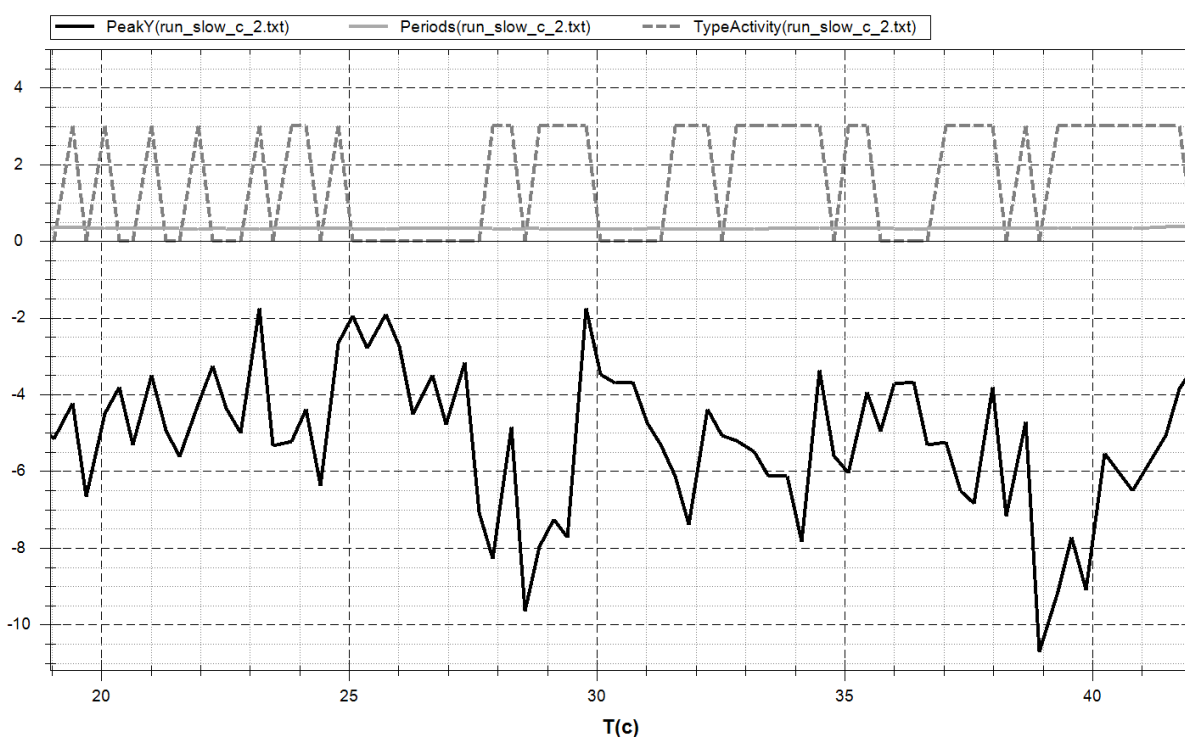


Рис. 7. Графики с усредненными значениями пиков, периодами между пиками и рассчитанным типом активности, полученные во время медленного бега

Для типа активности «ходьба» были проведены два опыта, полученные во время быстрой ходьбы (рис. 8) и спокойной ходьбы (рис. 9).

На рис. 8 и 9 выводятся найденные периоды между пиками (Periods) и усредненные максимальные отрицательные значения ускорения (PeakY).

Также на рис. 8 и 9 изображен график Type-Activity. По нему видно, что он принимает значение 2, что соответствует типу активности

«ходьба». Следовательно, программа на микроконтроллере определяет ходьбу с разной скоростью (спокойную и быструю).

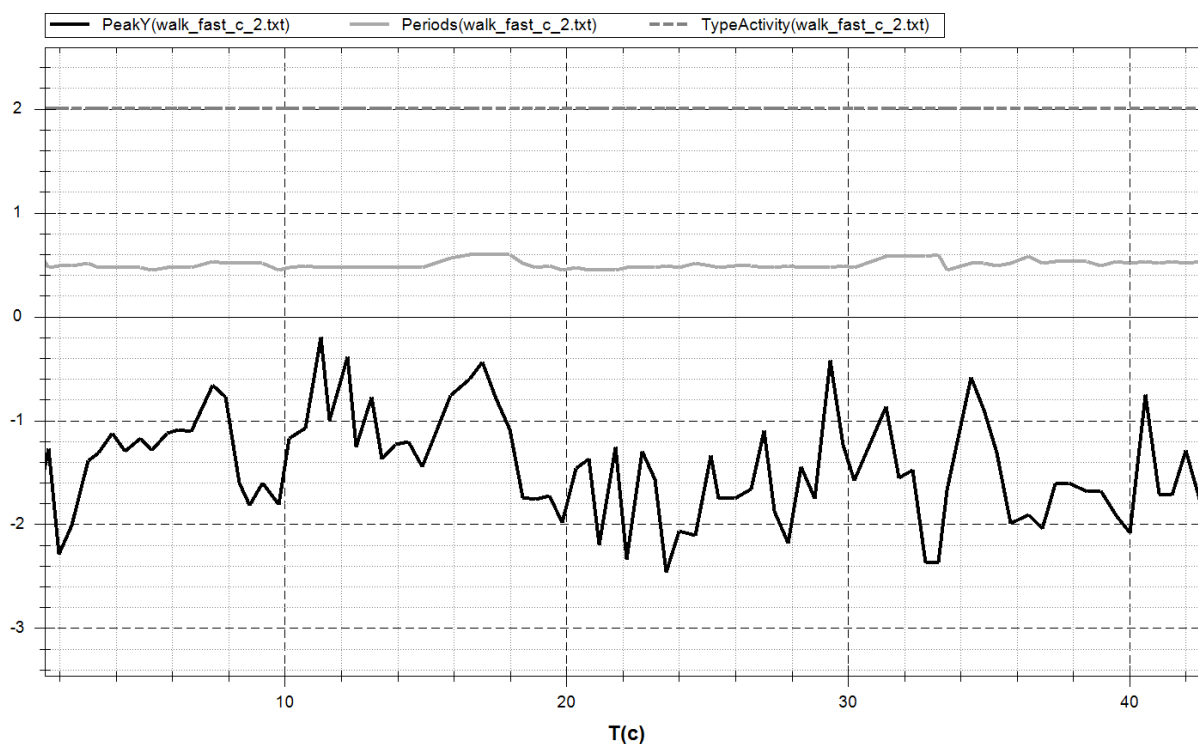


Рис. 8. Графики с усредненными значениями пиков, периодами между пиками и рассчитанным типом активности, полученные во время быстрой ходьбы

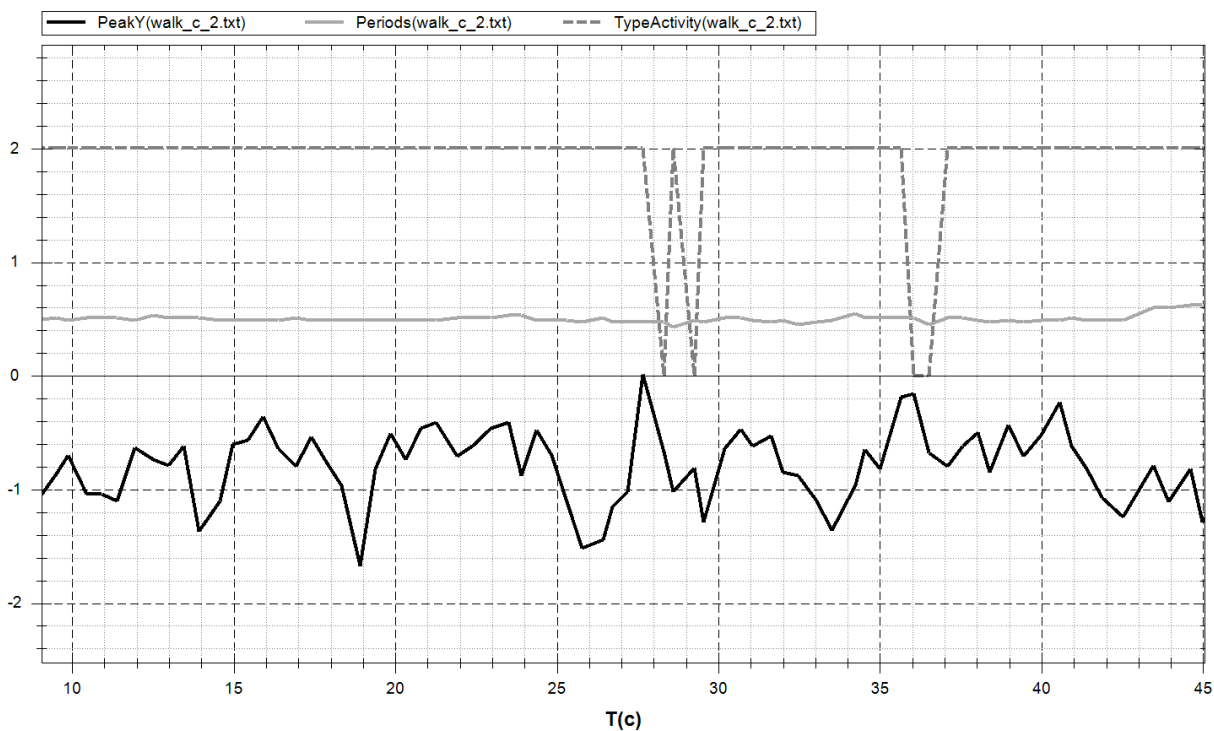


Рис. 9. Графики с усредненными значениями пиков, периодами между пиками и рассчитанным типом активности, полученные во время спокойной ходьбы

### Заключение

В ходе выполнения работы была спроектирована и изготовлена микропроцессорная система для определения типа физической активности человека (ходьба, бег, приседания) на базе микроконтроллера STM32F401CCU6 и акселерометра MPU9250.

Был произведен подбор электронных компонентов, спроектирована печатная плата и изготовлен действующий прототип носимого устройства. Конструкция обеспечивает автономность в течение 24 часов, малые габариты и возможность крепления на теле человека.

Основным результатом работы стала разработка алгоритма выявления характерных признаков движений, основанного на анализе отрицательных пиков ускорения по оси Y и временных интервалов между ними. Алгоритм позволяет выявить циклы движений из непрерывного потока данных акселерометра.

Организована передача результатов классификации и первичных данных на внешнее устройство по Bluetooth, что позволяет визуализировать информацию, сохранять ее для последующего анализа и при необходимости оперативно вмешиваться в процесс мониторинга.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило работоспособность разработанной системы. В ходе испытаний с участием человека, выполняющего различные виды активности (приседания, ходьба в различном темпе, бег в различном темпе), устройство продемонстрировало определение типа движений. Анализ полученных графиков показывает, что классификация сохраняется для различных темпов ходьбы и бега. Наличие класса «неопределенная активность» позволяет отфильтровывать статические состояния и переходные процессы.

Разработанная система может найти применение в спортивных тренировках для автоматического подсчета повторений упражнений, во время восстановления после перенесенных травм для контроля за выполнением двигательных программ, а также в системах безопасности для мониторинга состояния персонала, работающих в трудных условиях, выходящих за пределы нормы и имеющих опасные последствия для здоровья человека [8].

Дальнейшее развитие работы может быть направлено на расширение классифицируемых типов активности (например, прыжки, езда на велосипеде, подъем по лестнице), использование методов машинного обучения для повыше-

ния точности распознавания, а также интеграцию дополнительных датчиков (гироскоп, магнитометр) для более полного описания кинематики движений.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Li, M., Kim Y.T. 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. – Т. 17, № 11. – С. 1–17.
2. Jarrah, M., Toubal A., Bengherbia B. Enhancing Elderly Care with Wearable Technology: Development of a Dataset for Fall Detection and ADL Classification During Muslim Prayer Activities / Mutasem Jarrah, Abdelmoughni Toubal, Billel Bengherbia // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2024. – Т. 50, № 8. – С. 1–20.
3. Karantonis, D. M. Implementation of a real-time human movement classifier using a triaxial accelerometer for ambulatory monitoring / D. M. Karantonis [et al.] // *IEEE transactions on information technology in biomedicine*. – 2006. – Vol. 10, No. 1. – С. 156–167.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Панарин, В. М. Разработка системы сбора данных интеллектуальной системы мониторинга воздействия вредных и опасных факторов на работников промышленных предприятий / В. М. Панарин, А. А. Маслова, К. В. Гришаков // *Безопасность труда в промышленности*. – 2019. – № 5. – С. 75–79. – DOI: 10.24000/0409-2961-2019-5-75-79.
8. Смирнов, М. А. Мониторинг опасных зон и рабочих на строительной площадке / М. А. Смирнов, А. В. Ясенецкий, А. Д. Чикин // *Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сборник трудов Международной научно-практической конференции, г. Волгоград, 1–2 декабря 2020 г. : в 2 ч.* – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2020. – Ч. 2. – С. 32–34.
9. Разработка цифровой системы для регистрации электрокардиограммы и типа физической активности человека / В. И. Конченков, А. В. Сомов, П. С. Тарасов, Г. А. Шишкин // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. – 2026. – № 1(54). – С. 43–52. – DOI: 10.35211/2500-0586-2026-1-54-43-52.
10. MPU-9250 Register Map and Descriptions Revision 1.6 : документация. – URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/RM-MPU-9250A-00-v1.6.pdf> (дата обращения: 20.02.2026). – Текст: электронный.
11. An Intuitive Look at Moving Average and CIC Filters. – URL: <https://tomverbeure.github.io/2020/09/30/Moving-Average-and-CIC-Filters.html> (дата обращения 20.02.2026).
12. 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.

## REFERENCES

1. Li, M., Kim Y.T. 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. - T. 17, № 11. - P. 1-17.

2. Jarrah, M., Toubal A., Bengherbia B. Enhancing Elderly Care with Wearable Technology: Development of a Dataset for Fall Detection and ADL Classification During Muslim Prayer Activities / Mutasem Jarrah, Abdelmoughni Toubal, Billel Bengherbia // *Arabian Journal for Science and Engineering*. - 2024. - T. 50, № 8. - P. 1-20.

3. Karantonis, D. M. Implementation of a real-time human movement classifier using a triaxial accelerometer for ambulatory monitoring / D. M. Karantonis [et al.] // *IEEE transactions on information technology in biomedicine*. - 2006. - Vol. 10, No. 1. - P. 156-167.

4. Davydov, V. K. Features of mechanics of the working prototype of the rehabilitation exoskeleton of the lower extremities / V. K. Davydov. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2023; 77-82. (In Russian)

5. Koptelova, I. A., Somov A.V. Analysis of the operational characteristics of Holter sensors for the development of a physical activity management system. *Energy and resource conservation: industry and transport*, 2023; 2(43); 21-23. (In Russian)

6. Somov, A. V. Digital exercise monitoring system / A.V. Somov, A.I. Nefediev. *Energy and resource conservation: industry and transport*, 2025; 1(50); 45-49. (In Russian)

7. Panarin, V. M., Maslova A.A., Grishakov K.V. Development of an intelligent data collection system for monitoring the effects of harmful and dangerous factors on industrial workers. *Occupational safety in industry*, 2019; 75-79. (In Russian)

8. Smirnov, M. A., Yassenetsky A.V., Chikin A.D. Monitoring of hazardous areas and workers on the construction site. *Actual problems and prospects of the construction complex development : proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, Volgograd, December 1-2, 2020 : at 2 a.m. - Volgograd : Volgograd State Technical University, 2020; Part 2; 32-34. (In Russian)

9. Development of a digital system for recording electrocardiograms and the type of physical activity of a person / V. I. Konchenkov, A.V. Somov, P. S. Tarasov, G. A. Shishkin. *Energy and resource conservation: industry and transport*, 2026; 1(54); 43-52. (In Russian)

10. MPU-9250 Register Map and Descriptions Revision 1.6 [Electronic resource] : documentation. - URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/RM-MPU-9250A-00-v1.6.pdf> (date of access 20.02.2026).

11. An Intuitive Look at Moving Average and CIC Filters [Electronic resource]. - URL: <https://tomverbeure.github.io/2020/09/30/Moving-Average-and-CIC-Filters.html> (date of access 20.02.2026).

12. Smith, S. Digital signal processing. A practical guide for engineers and researchers / Stephen Smith; translated from English by A. Y. Linovich, S. V. Vityazev, I. S. Gusinsky. Moscow : DMK-Press; 2019; 718 p. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 14.05.2026, доработана 18.05.2026, подписана в печать 19.05.2026

The article was submitted 14.05.2026, revised 18.05.2026, accepted for publication 19.05.2026

УДК 621.354.322.6

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-37-41

Научная статья

Original article

*А. И. Нефедьев, Д. А. Варвин*

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СВИНЦОВО-КАЛЬЦИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

**Аннотация.** Распространенные в настоящее время свинцово-кальциевые аккумуляторные батареи требуют особого режима заряда по сложному алгоритму. Для зарядки такого типа аккумуляторных батарей было разработано интеллектуальное зарядное устройство на основе микроконтроллера фирмы MicroChip, позволяющее автоматизировать процесс зарядки и минимизировать влияние человеческого фактора для обеспечения долговременной работы аккумуляторных батарей кальциевого типа в любых условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** кальциевый аккумулятор, АКБ, импульсный преобразователь напряжения, индикатор, добивка, стабилизация тока

**Для цитирования:** Нефедьев А. И., Варвин Д. А. Интеллектуальное зарядное устройство для свинцово-кальциевых аккумуляторов. *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*. 2026; 2(55): 37–41. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-37-41.

#### Информация об авторах:

**Алексей Иванович Нефедьев** – доцент, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника» ВолгГТУ <https://orcid.org/0000-0002-1470-3618>

e-mail: nefediev@rambler.ru

**Дмитрий Александрович Варвин** – магистрант кафедры «Электротехника» ВолгГТУ

e-mail: varvin.2003@mail.ru

**Вклад авторов:**

**А. И. Нefeld'ев** – разработка общей концепции построения устройства и электрической схемы, написание статьи.

**Д. А. Варвин** – сборка, настройка и исследование устройства, оформление материалов, написание статьи.

*A. I. Nefed'ev, D. A. Varvin*

**SMART CHARGER FOR LEAD-CALCIA BATTERIES**

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

✉ Alexey I. Nefed'ev, nefediev@rambler.ru

**Abstract.** Lead-calcium batteries, commonly used today, require a special charging regimen based on a complex algorithm. To charge this type of battery, an intelligent charger based on a MicroChip microcontroller was developed. This device automates the charging process and minimizes human intervention, ensuring long-lasting performance of calcium batteries under any operating conditions.

**Keywords:** calcium battery, battery, pulse voltage converter, indicator, charging, current stabilization

**For citation:** Nefed'ev A. I., Varvin D. A. Smart charger for lead-calcia batteries. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 2(55): 37–41. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-37-41.

**Information about the authors:**

**Alexey I. Nefed'ev** – Doc. Tech. Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering VSTU  
<https://orcid.org/0000-0002-1470-3618>

e-mail: nefediev@rambler.ru

**Dmitry A. Varvin** – Master's student of the Department of Electrical Engineering VSTU

e-mail: varvin.2003@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Alexey I. Nefed'ev** – developing a general concept for the device and its electrical circuit, article writing.

**Dmitry A. Varvin** – assembling, setting up, and researching the device, preparing materials, article writing.

В настоящее время в автомобилях наиболее распространены свинцово-кальциевые аккумуляторы (АКБ) [1–3]. Кальциевые отличаются от стандартных аккумуляторов несколькими ключевыми характеристиками:

- низкий саморазряд;
- малый саморазряд;
- увеличенный срок службы;
- повышенный пусковой ток;
- повышенная чувствительность к глубоким разрядам;

– более высокое напряжение заряда по сравнению со стандартными аккумуляторами [4; 5].

При разработке зарядного устройства учитывались его основные параметры: максимальное зарядное напряжение, максимальный зарядный ток, емкость АКБ, наличие индикации, наличие ручных регулировок, наличие защит. В зарядном устройстве должны быть реализованы защиты от скачков сетевого напряжения, от переплюсовки на выходе, от перегрузки, от перегрева и от перезарядки аккумуляторной батареи [6].

Ручные регулировки параметров зарядного устройства необходимы в случае, если зарядное устройство рассчитано на несколько типов аккумуляторов. Сюда также относятся либо плавные регулировки напряжения и тока, либо про-

граммные предустановки в автоматических зарядных устройствах.

Основные отличия зарядных устройств для свинцово-кальциевых и свинцово-сурьмянистых АКБ заключаются в значении максимального напряжения при его зарядке и в режиме зарядки.

Зарядку кальциевых АКБ производят постоянным током до напряжения 16,1 В. Обычные зарядные устройства с максимальным напряжением 14,8 В могут обеспечить заряд АКБ только до половины емкости, а при напряжении 15,5 В – 75–80 % емкости. Поскольку автомобильные генераторы при движении автомобиля обычно не обеспечивают напряжение в бортовой сети выше 14,5 В, кальциевые АКБ следует заряжать один раз в 1–2 месяца с использованием зарядных устройств, соответствующих типу заряжаемой АКБ.

При зарядке максимальное напряжение кальциевых АКБ достигает 16,1 В, а минимальное напряжение при эксплуатации – 11,9 В. Для достижения полного заряда необходимо использовать режим «добивки», заключающийся в периодическом отключении зарядного тока после достижения напряжения 16,1 В на зажимах АКБ, и включении его при снижении напряжения до 13,2 В. При этом контролируется

время увеличения напряжения с 13,2 В до 16,1 В, и как только оно станет меньше 1 минуты, процесс заряда АКБ прекращается.

На рис.1 представлены временные диаграммы тока и напряжения свинцово-кальциевой

АКБ емкостью 55 А·ч в процессе заряда. Для сравнения на рис. 2 представлены временные диаграммы тока и напряжения свинцово-сурьмянистой АКБ емкостью 55 А·ч в процессе заряда.

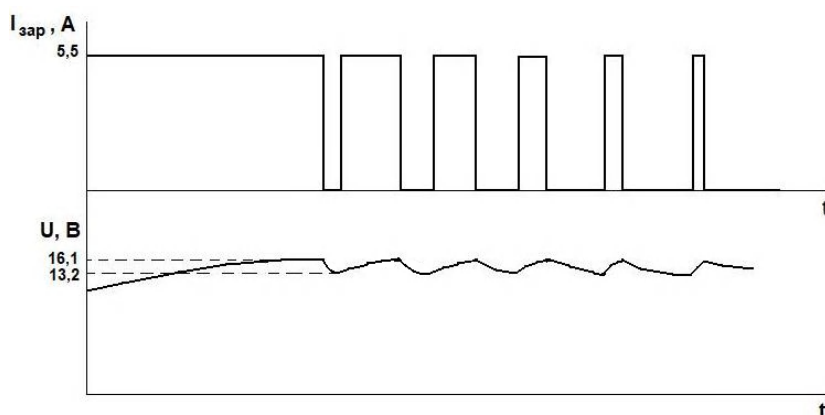


Рис. 1. Временные диаграммы тока и напряжения при зарядке свинцово-кальциевой АКБ

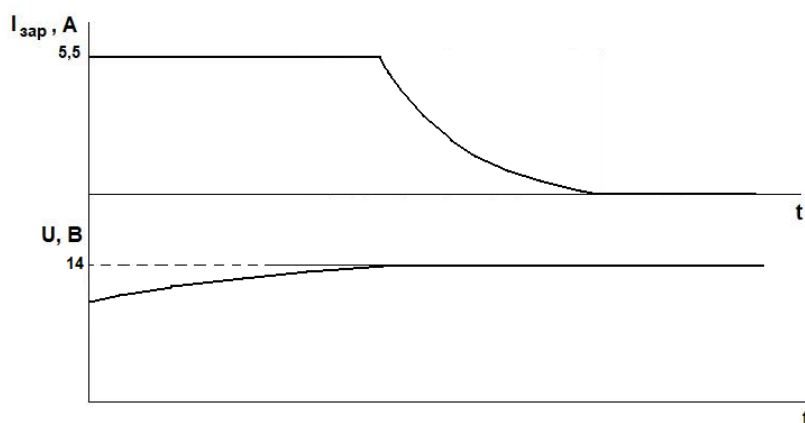


Рис. 2. Временные диаграммы тока и напряжения при зарядке свинцово-сурьмянистой АКБ

Значение максимального зарядного тока  $I_{зар}$  обычно выбирается в зависимости от емкости заряжаемого аккумулятора:

$$I_{зар} = C / 10,$$

где  $C$  – емкость АКБ (А·ч).

Зарядное устройство подключается к заряжаемой аккумуляторной батарее при помощи сопротивления соединительных проводов. Из-за наличия активного сопротивления соединительных проводов напряжение на выходе зарядного устройства и напряжение  $U_{АКБ}$  на клеммах АКБ отличается

$$U_{АКБ} = U_{выхЗУ} - I_{зар} \cdot R_{пр},$$

где  $U_{выхЗУ}$  – напряжение на выходе зарядного устройства,  $R_{пр}$  – сопротивление двух соединительных проводов.

Сопротивление жилы провода МГШВ 1,0 длиной 1 м при температуре 20 °С составляет не более 20,4 Ом/км, при этом сопротивление двух соединительных проводов длиной 1 м составит 40,8 мОм. Падение напряжения на соединительных проводах при зарядке АКБ составит

$$U_{пр} = I_{зар} \cdot R_{пр} = 5,5 \cdot 40,8 = 224,4 \text{ мВ},$$

и должно быть учтено при выборе максимального напряжения зарядки АКБ.

Для автоматического заряда наиболее распространенных свинцово-сурьмянистых и свинцово-кальциевых АКБ емкостью 55-60 А·ч было разработано интеллектуальное зарядное устройство [7; 8], структурная схема которого представлена на рис. 3.

Основу зарядного устройства составляет сетевой обратноходовой преобразователь напряжения типа AC/DC [7; 8], у которого имеются обратные связи как по напряжению, так и по току. Максимальное напряжение на выходе зарядного устройства может быть установлено 14,8 В для свинцово-сурьмянистых АКБ и 16,1 В для свин-

цово-кальциевых АКБ. Ток заряда выбирается при помощи переключателя 2,75 А для гелевых АКБ и 5,5 А для свинцово-кислотных АКБ.

Для управления процессом заряда АКБ и для управления индикацией был использован микроконтроллер типа PIC16F886А фирмы MicroChip.

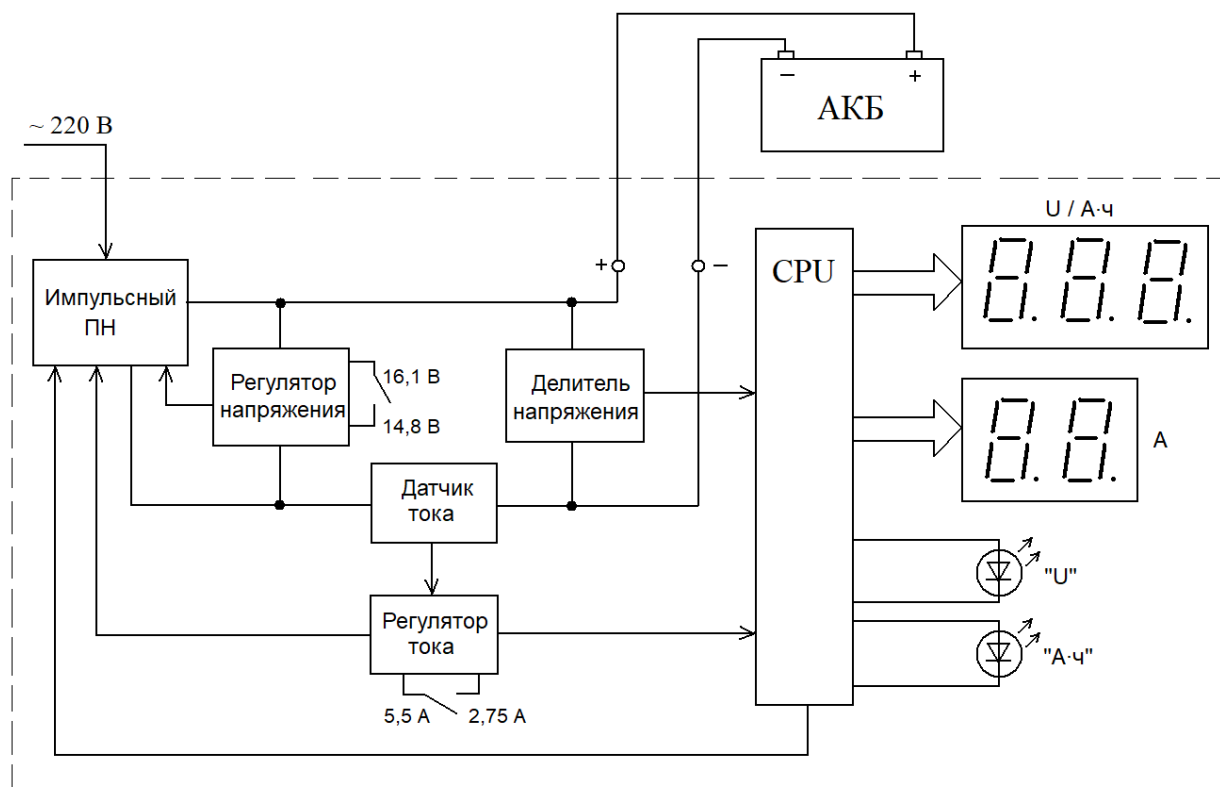


Рис. 3. Структурная схема интеллектуального зарядного устройства

В процессе заряда АКБ индицируются следующие параметры: ток заряда, напряжение на аккумуляторе и количество энергии, полученное АКБ в процессе заряда. Напряжение и количество энергии, полученное АКБ, индицируются на одном трехразрядном индикаторе поочередно с указанием индицируемой величины при помощи точечных светодиодных индикаторов.

В качестве корпуса использован алюминиевый бокс, являющийся одновременно теплоотводом. Зарядное устройство работает в автоматическом режиме и не требует участия человека в процессе заряда АКБ.

Внешний вид интеллектуального зарядного устройства представлен на рис. 4.

Эксплуатация опытного экземпляра интеллектуального зарядного устройства в течение 1 года показала его высокую надежность и соответствие расчетным параметрам.

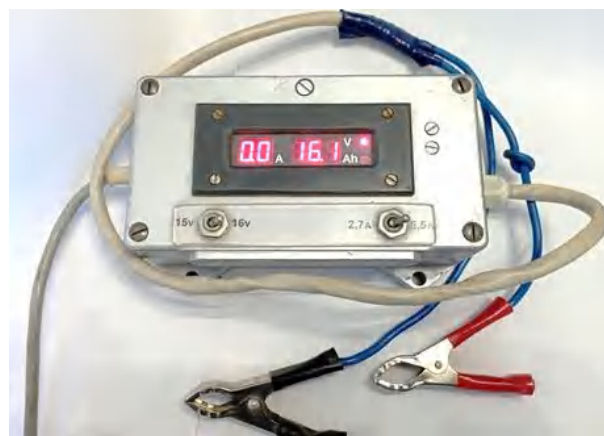


Рис. 4. Внешний вид опытного экземпляра интеллектуального зарядного устройства

Таким образом, разработанное интеллектуальное зарядное устройство позволит правильно и полностью зарядить как свинцово-кальциевые, так и свинцово-сурьмянистые АКБ,

нуждающиеся в разных методах зарядки. Неполная зарядка особенно сильно сказывается на уменьшении срока эксплуатации АКБ, особенно свинцово-кальциевых. Использование рекомендованных производителем аккумуляторов режимов зарядки каждого типа АКБ, включая контроль напряжения и тока, снижает риск потери емкости. Автоматизация процесса зарядки с помощью интеллектуальных зарядных устройств позволяет минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечить долговременную работу аккумуляторов в любых условиях эксплуатации.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 53165-2008. Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники. Общие технические условия. Взамен ГОСТ 959-2002 и ГОСТ 29111-91. – М.: Стандартинформ, 2009. – 34 с.
2. Курзуков, Н. И. Аккумуляторные батареи. Краткий справочник / Н. И. Курзуков, В. М. Ягнятинский. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем» 2006. – 88 с.
3. Хрусталева, Д. А. Аккумуляторы / Д. А. Хрусталева. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.
4. Дубкова, Е. С. Влияние напряжения на увеличение срока службы свинцово-кислотных аккумуляторов / Е. С. Дубкова // Исследования. Инновации. Практика. – Самара, 2023. – № 1 (6). – С. 6–9.
5. Чебоксаров, А. Н. Методы зарядки свинцово-кислотных аккумуляторных батарей / А. Н. Чебоксаров // Техно-технологические проблемы сервиса. – 2024. – № 4(70). – С. 13–16.
6. Захаров, И. А. Зарядное устройство для свинцово-кислотных автомобильных аккумуляторов 40 А·ч / И. А. Захаров // Инновационная наука, 2022. – С. 1–3.

7. Патент РФ на полезную модель № 110561 U1, МПК H05J 7/00. Зарядное устройство для аккумуляторных батарей / А. И. Нефедьев; № 2011124489/07; заявл. 16.06.2011; опублик. 20.11.2011. Бюл. № 32.

8. Патент РФ на полезную модель № 168794 U1, МПК H02J 7/04. Зарядное устройство для аккумуляторных батарей / А. И. Нефедьев, А. В. Исаев, Д. К. Азарян; №2016143810 : заявл. 08.11.2016 : опублик. 21.02.2017. Бюл. № 6.

#### REFERENCES

1. GOST R 53165-2008. Lead-acid starter batteries for automotive and tractor equipment. General specifications. Replaces GOST 959-2002 and GOST 29111-91. - Moscow: Standartinform, 2009. - 34 p.
2. Kurzakov, N.I. Rechargeable batteries. Brief reference / N.I. Kurzakov, V.M. Yagnyatinsky. - Moscow: ООО "За Рулем" Book Publishing House, 2006. - 88 p.
3. Khrustaleva, D.A. Batteries / D.A. Khrustaleva. - Moscow: Izumrud, 2003. - 224 p.
4. Dubkova, E.S. The Effect of Voltage on Increasing the Service Life of Lead-Acid Batteries / E.S. Dubkova // Research. Innovations. Practice. - Samara. 2023. No. 1 (6). Pp. 6-9.
5. Cheboksarov, A. N. Methods of charging lead-acid storage batteries / A. N. Cheboksarov // Technical and technological problems of service. - 2024. - No. 4 (70). - Pp. 13-16.
6. Zakharov, I.A. Charger for 40 Ah lead-acid automotive batteries // Innovative Science, 2022. - Pp. 1 - 3.
7. Russian Federation Patent for Utility Model No. 110561 U1, IPC H05J 7/00. Charger for rechargeable batteries / A.I. Nefed'ev; No. 2011124489/07; declared 16.06.2011; published 20.11.2011. Bulletin No. 32.
8. Russian Federation Patent for Utility Model No. 168794 U1, IPC H02J 7/04. Charger for rechargeable batteries // A.I. Nefed'ev, A.V. Isaev, D.K. Azaryan; No. 2016143810: declared 08.11.2016; published 21.02.2017. Bulletin No. 6.

Статья поступила в редакцию 29.04.2026, доработана 13.05.2026, подписана в печать 15.05.2026  
The article was submitted 29.04.2026, revised 13.05.2026, accepted for publication 15.05.2026

УДК 629.3.018; 629.3.027.3  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-42-49

Научная статья  
Original article

*В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, И. А. Беляков*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ  
С АДАПТИВНЫМИ ГИДРОАМОРТИЗАТОРАМИ**

**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия**

✉ Иван Александрович Беляков, [ivan.belyakov2018@gmail.com](mailto:ivan.belyakov2018@gmail.com)

**Аннотация.** Представлены расчетная схема и пространственная математическая модель подвески 4-х опорного автомобиля с адаптивными гидроамортизаторами, реализующими цикловое регулирование сопротивления с рабочей диаграммой в виде плавной «бабочки». Приведены результаты расчетов в виде среднеквадратических вертикальных ускорений подрессоренной массы в третьоктавных полосах частот при движении автомобиля по гладкому и выбитому булыжнику с разными скоростями. Из анализа результатов расчета следует, что при движении по разным типам дорог предлагаемый адаптивный амортизатор позволяет существенно уменьшать среднеквадратические ускорения кузова.

**Ключевые слова:** адаптивный амортизатор, подвеска, рабочая диаграмма, спектры вертикальных ускорений, математическая модель, автотранспортное средство

**Для цитирования:** Новиков В. В., Чернышов К. В., Поздеев А. В., Беляков И. А. Математическая модель подвески автомобиля с адаптивными гидроамортизаторами. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 42–49. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-42-49.

**Информация об авторах:**

**Вячеслав Владимирович Новиков** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-0917-781X>

e-mail: [nvv\\_60@mail.ru](mailto:nvv_60@mail.ru)

**Константин Владимирович Чернышов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-2816-1768>

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

**Алексей Владимирович Поздеев** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-3144-3619>

e-mail: [avp24897@mail.ru](mailto:avp24897@mail.ru)

**Иван Александрович Беляков** – аспирант кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0002-0824-2883>

e-mail: [ivan.belyakov2018@gmail.com](mailto:ivan.belyakov2018@gmail.com)

**Вклад авторов:**

**В. В. Новиков** – научное руководство работой, разработка общей концепции и методологии создания адаптивного гидроамортизатора, подготовка описания принципа действия конструкции и формулировка выводов.

**К. В. Чернышов** – расчет требуемых параметров адаптивного гидроамортизатора.

**А. В. Поздеев** – выполнение конструкторской проработки рессоры, разработка схемы работы адаптивных клапанов и участие в оформлении статьи.

**И. А. Беляков** – оформление чертежей, участие в проектировании гидравлических узлов, техническое редактирование и структурирование текста статьи.

V. V. Novikov, K. V. Chernyshov, A. V. Pozdeev, I. A. Belyakov

**MATHEMATICAL MODEL OF CAR SUSPENSION  
WITH ADAPTIVE HYDRAULIC SHOCK ABSORBERS**

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

✉ Ivan A. Belyakov, ivan.belyakov2018@gmail.com

**Abstract.** The calculation scheme and spatial mathematical model of a 4-post vehicle suspension with adaptive hydraulic shock absorbers, implementing cyclic resistance control with a smooth "butterfly" working diagram, are presented. The results of calculations are presented in the form of the mean-square vertical accelerations of the sprung mass in third-octave frequency bands when a vehicle is moving on smooth and broken cobblestones at different speeds. Analysis of calculation results shows that the proposed adaptive damper significantly reduces average body accelerations across different road types.

**Keywords:** adaptive shock absorber, suspension, working diagram, vertical acceleration spectra, mathematical model, motor vehicle

**For citation:** Novikov V. V., Chernyshov K. V., Pozdeev A. V., Belyakov I. A. Mathematical model of car suspension with adaptive hydraulic shock absorbers. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 2(55): 42–49. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-42-49.

**Information about the authors:**

**Vyacheslav V. Novikov** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automatic Installations VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-0917-781X>

e-mail: nvv\_60@mail.ru

**Konstantin V. Chernyshov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Operation and Repair of Automobiles VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-2816-1768>

e-mail: chernykv@rambler.ru

**Alexey V. Pozdeev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Installations VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-3144-3619>

e-mail: avp24897@mail.ru

**Ivan A. Belyakov** – graduate student of the Department of Automatic Installations VSTU

<https://orcid.org/0009-0002-0824-2883>

e-mail: avp24897@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Vyacheslav V. Novikov** – scientific supervision of the work, development of a general concept and methodology for creating an adaptive hydraulic shock absorber, preparation of a description of the design's principle of operation, and formulation of conclusions.

**Konstantin V. Chernyshov** – calculation of the required parameters of an adaptive hydraulic shock absorber.

**Alexey V. Pozdeev** – design of the spring, development of the adaptive valve operation scheme, and participation in the article's layout.

**Ivan A. Belyakov** – drawing design, participation in the design of hydraulic units, technical editing, and structuring of the article text.

Средняя скорость и плавность хода автомобилей при движении, особенно по разбитым дорогам, во многом определяются параметрами подвески, которая должна обеспечивать эффективное гашение резонансных колебаний кузова и колес и не увеличивать колебания в межрезонансных зонах. Решение этой задачи возможно при применении регулирования сопротивления амортизаторов. В работах [1–6; 10] представлен анализ известных и разрабатываемых в ВолгГТУ новых алгоритмов регулирования сопротивления в цикле колебаний, позволяющих существ-

венно уменьшить резонансные колебания кузова и неэффективные потери энергии в подвеске.

В работах [7–8] представлено описание устройства и работы адаптивных гидроамортизаторов, реализующих рабочие диаграммы в виде узкой и широкой плавных «бабочек», обеспечивающих увеличение сопротивления при смене направления деформации подвески и его плавное уменьшение после прохода [7] и при подходе [8] к среднему положению. При этом при малых колебаниях реализуется узкая «бабочка», а при больших – широкая «бабочка».

Пример рабочих диаграмм с узкой (замкнутая линия abcdefg) и широкой (замкнутая линия aa'bcdd'efg) «бабочками» по патенту РФ на полезную модель № 230709 показан на рис. 1 [8; 9].

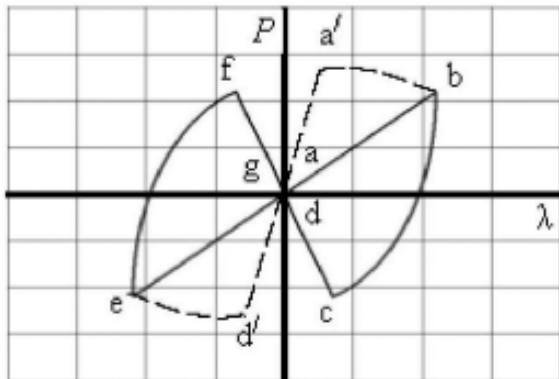


Рис. 1. Рабочие диаграммы подвески с линейным упругим элементом и адаптивным гидроамортизатором: замкнутая линия abcdefg – при открытом клапане-реле; замкнутая линия aa'bcdd'efg – при закрытом клапане-реле

На рис. 2 представлена расчетная схема четырехпорной пятимассовой модели АТС с па-

раметрами автомобиля «ГАЗель» при его движении по дорожному профилю.

На рис. 2 обозначено:  $M$  – поддрессоренная масса;  $J_x$  и  $J_y$  – моменты инерции поддрессоренной массы относительно соответствующих осей;  $c_1$  и  $c_2$  – жесткости рессор передней и задней подвески;  $k_{1л}$ ,  $k_{2л}$ ,  $k_{1п}$  и  $k_{2п}$  – коэффициенты демпфирования амортизаторов передней и задней подвески;  $m_1$  и  $m_2$  – передняя и задняя неподдрессоренные массы;  $c_{1ш}$  и  $c_{2ш}$  – жесткости шин переднего и заднего колес;  $k_{1ш}$  и  $k_{2ш}$  – коэффициенты демпфирования шин переднего и заднего колес;  $l_1$  и  $l_2$  – расстояния от центра масс до вертикальных осей передней и задней подвесок;  $B$  – расстояние между колесами одной оси (колея);  $x$ ,  $y$  и  $z$  – продольная, поперечная и вертикальная оси поддрессоренной массы в статическом положении;  $q_{1л}$  и  $q_{2л}$  – кинематическое возмущение под передним левым и задним левым колесами;  $q_{1п}$  и  $q_{2п}$  – кинематическое возмущение под правым передним и правым задним колесами;  $z$  – вертикальное перемещение центра поддрессоренной массы;  $\psi$ ,  $\varphi$  и  $\chi$  – угловое

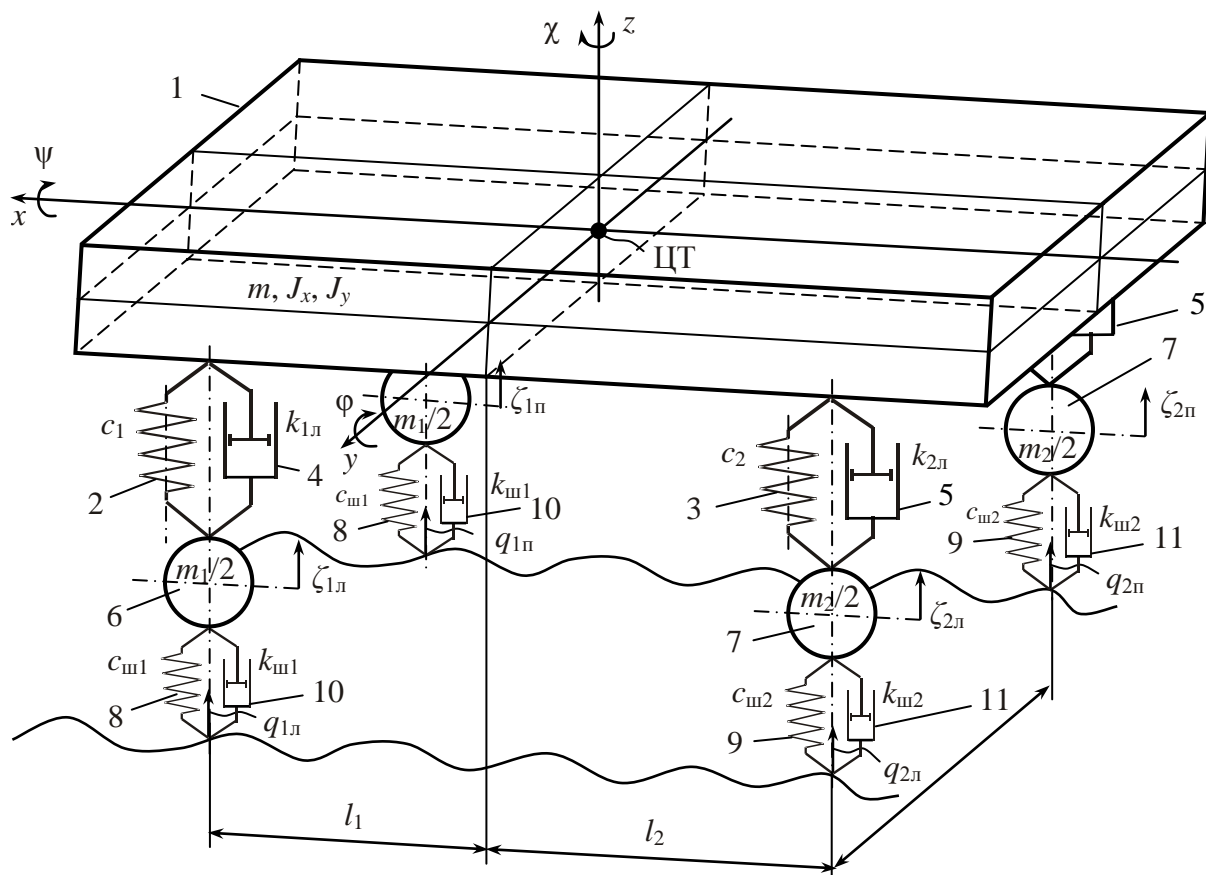


Рис. 2. Расчетная схема четырехпорной пятимассовой модели АТС с адаптивными гидроамортизаторами: 1 – поддрессоренная масса; 2 – передний упругий элемент (рессора); 3 – задний упругий элемент (рессора); 4 – передний демпфер (амортизатор); 5 – задний демпфер (амортизатор); 6 – передняя неподдрессоренная масса; 7 – задняя неподдрессоренная масса; 8 и 10 – передняя шина с упругими и демпфирующими свойствами; 9 и 11 – задняя шина с упругими и демпфирующими свойствами

перемещение поддресоренной массы, соответственно, относительно осей  $x$ ,  $y$  и  $z$ ;  $\zeta_{1л}$  и  $\zeta_{2л}$  – вертикальное перемещение левой передней и левой задней неподресоренных масс;  $\zeta_{1п}$  и  $\zeta_{2п}$  – верти-

кальное перемещение правой передней и правой задней неподресоренных масс.

Математическая модель динамики модели автомобиля имеет вид:

$$\begin{aligned} & M\ddot{z} + k_{1л}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1л}) + k_{1п}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1п}) + \\ & + k_{2л}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2л}) + k_{2п}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2п}) + \\ & + c_1(z + \phi l_{1л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1л}) + c_1(z + \phi l_{1п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1п}) + \\ & + c_2(z - \phi l_{2л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2л}) + c_2(z - \phi l_{2п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2п}) = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & J_y\ddot{\phi} + k_{1л}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1л})l_{1л} + k_{1п}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1п})l_{1п} - \\ & - k_{2л}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2л})l_{2л} - k_{2п}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2п})l_{2п} + \\ & + c_1(z + \phi l_{1л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1л})l_{1л} + c_1(z + \phi l_{1п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1п})l_{1п} - \\ & - c_2(z - \phi l_{2л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2л})l_{2л} - c_2(z - \phi l_{2п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2п})l_{2п} = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & J_x\ddot{\psi} + k_{1л}\frac{B}{2}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1л}) - k_{1п}\frac{B}{2}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1п}) + \\ & + k_{2л}\frac{B}{2}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2л}) - k_{2п}\frac{B}{2}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2п}) + \\ & + c_1\frac{B}{2}(z + \phi l_{1л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1л}) - c_1\frac{B}{2}(z + \phi l_{1п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1п}) + \\ & + c_2\frac{B}{2}(z - \phi l_{2л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2л}) - c_2\frac{B}{2}(z - \phi l_{2п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2п}) = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{m_1}{2}\ddot{\zeta}_{1л} + k_w(\dot{\zeta}_{1л} - \dot{q}_{1л}) + c_w(\zeta_{1л} - q_{1л}) - \\ & - k_{1л}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1л}) - c_1(z + \phi l_{1л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1л}) = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{m_1}{2}\ddot{\zeta}_{1п} + k_w(\dot{\zeta}_{1п} - \dot{q}_{1п}) + c_w(\zeta_{1п} - q_{1п}) - \\ & - k_{1п}(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1п}) - c_1(z + \phi l_{1п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{1п}) = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{m_2}{2}\ddot{\zeta}_{2л} + k_w(\dot{\zeta}_{2л} - \dot{q}_{2л}) + c_w(\zeta_{2л} - q_{2л}) - \\ & - k_{2л}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2л} + \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2л}) - c_2(z - \phi l_{2л} + \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2л}) = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{m_2}{2}\ddot{\zeta}_{2п} + k_w(\dot{\zeta}_{2п} - \dot{q}_{2п}) + c_w(\zeta_{2п} - q_{2п}) - \\ & - k_{2п}(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2п} - \dot{\psi}\frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2п}) - c_2(z - \phi l_{2п} - \psi\frac{B}{2} - \zeta_{2п}) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Условия мгновенного отключения сопротивления в среднем положении его включения при смене направления деформации подвески (режим «бабочки»):

$$\begin{cases} k_{1н} = 0 & \text{при } (\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} + \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1н})(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} + \dot{\psi} \frac{B}{2}) < 0; \\ k_{1н} = k_1 & \text{при } (\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} + \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1н})(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} + \dot{\psi} \frac{B}{2}) \geq 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} k_{1н} = 0 & \text{при } (\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} - \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1н})(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} - \dot{\psi} \frac{B}{2}) < 0; \\ k_{1н} = k_1 & \text{при } (\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} - \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{1н})(\dot{z} + \dot{\phi}l_{1н} - \dot{\psi} \frac{B}{2}) \geq 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} k_{2н} = 0 & \text{при } (\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} + \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2н})(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} + \dot{\psi} \frac{B}{2}) < 0; \\ k_{2н} = k_2 & \text{при } (\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} + \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2н})(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} + \dot{\psi} \frac{B}{2}) \geq 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} k_{2н} = 0 & \text{при } (\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} - \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2н})(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} - \dot{\psi} \frac{B}{2}) < 0; \\ k_{2н} = k_2 & \text{при } (\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} - \dot{\psi} \frac{B}{2} - \dot{\zeta}_{2н})(\dot{z} - \dot{\phi}l_{2н} - \dot{\psi} \frac{B}{2}) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

и дополнительные условия отключения режима «бабочки» при увеличении деформации подвески на ходе сжатия на величину, больше чем половина статической деформации:

$$k_{1н} = k_1 \quad \text{при} \quad z + \phi l_{1н} + \psi \frac{B}{2} - \zeta_{1н} < -0,5 \cdot \frac{Mg}{2c_1} \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad (12)$$

$$k_{1н} = k_1 \quad \text{при} \quad z + \phi l_{1н} - \psi \frac{B}{2} - \zeta_{1н} < -0,5 \cdot \frac{Mg}{2c_1} \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad (13)$$

$$k_{2н} = k_2 \quad \text{при} \quad z - \phi l_{2н} + \psi \frac{B}{2} - \zeta_{2н} < -0,5 \cdot \frac{Mg}{2c_2} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad (14)$$

$$k_{2н} = k_2 \quad \text{при} \quad z - \phi l_{2н} - \psi \frac{B}{2} - \zeta_{2н} < -0,5 \cdot \frac{Mg}{2c_2} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}. \quad (15)$$

Результаты исследования математической модели, описываемой зависимостями (1)–(15), представлены в виде графиков вертикальных среднеквадратических ускорений точки подпрессоренной массы под сиденьем водителя «ГАЗели» в третьоктавных полосах частот (рис. 3–6). При этом использованы оптимальные параметры регулируемой подвески, полученные на основе анализа соответствующей опорной одномассовой колебательной системы [10]. На приведенных рисунках также обозначены границы допустимых вертикальных среднеквадратических ускорений подпрессоренной массы по усталости оператора в третьоктавных полосах частот: 1 – для одного часа езды;

2 – для четырех часов езды; 3 – для восьми часов езды, а также значения вертикальных среднеквадратических ускорений подпрессоренной массы в третьоктавных полосах (линия 4).

На рис. 3–6 показаны среднеквадратические вертикальные ускорения точки подпрессоренной массы под сиденьем водителя при движении автомобиля без регулирования демпфирования и с его регулированием.

На рис. 3 и 4 использован профиль «гладкий бульжник» и скорости движения автомобиля соответственно 36 км/ч и 72 км/ч. На рис. 5 и 6 использован профиль «выбитый бульжник» и скорости движения автомобиля соответственно 36 км/ч и 72 км/ч.

Из анализа результатов исследования подвески с плавным изменением демпфирования на пространственной модели АТС при движении по случайному дорожному профилю видно, что

происходит существенное снижение вертикальных ускорений поддресоренной массы во всем диапазоне рабочих частот. Однако вероятность отрыва колес от дороги при этом возрастает.

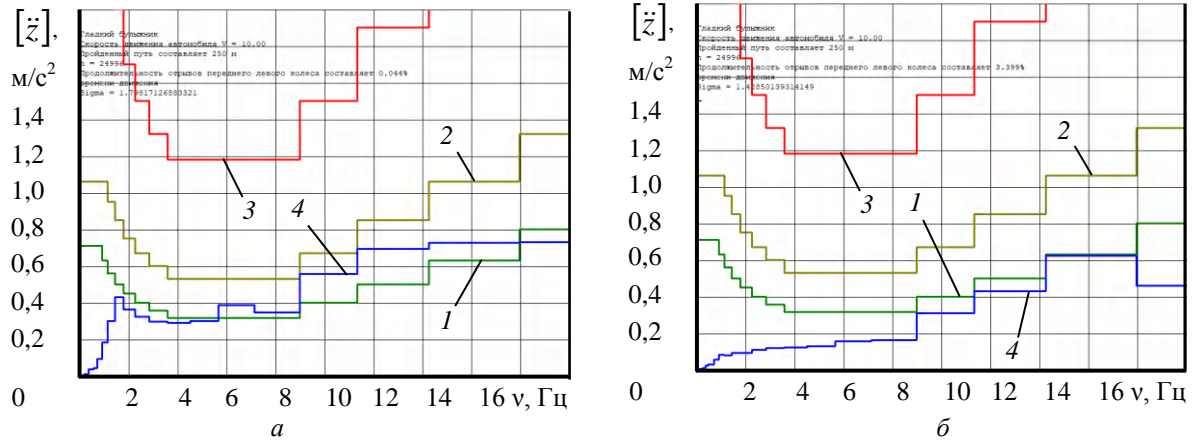


Рис. 3. Среднеквадратические вертикальные ускорения поддресоренной массы в третьоктавных полосах при движении по гладкому булыжнику со скоростью 36 км/ч:

1, 2, 3 – нормы для 1-го, 4-х, 8-ми часов езды; 4 – значения вертикальных среднеквадратических ускорений поддресоренной массы в третьоктавных полосах: а – классическая подвеска при  $\psi = 0,25$ ; б – подвеска с регулированием демпфирования при  $\psi_{max} = 0,25$

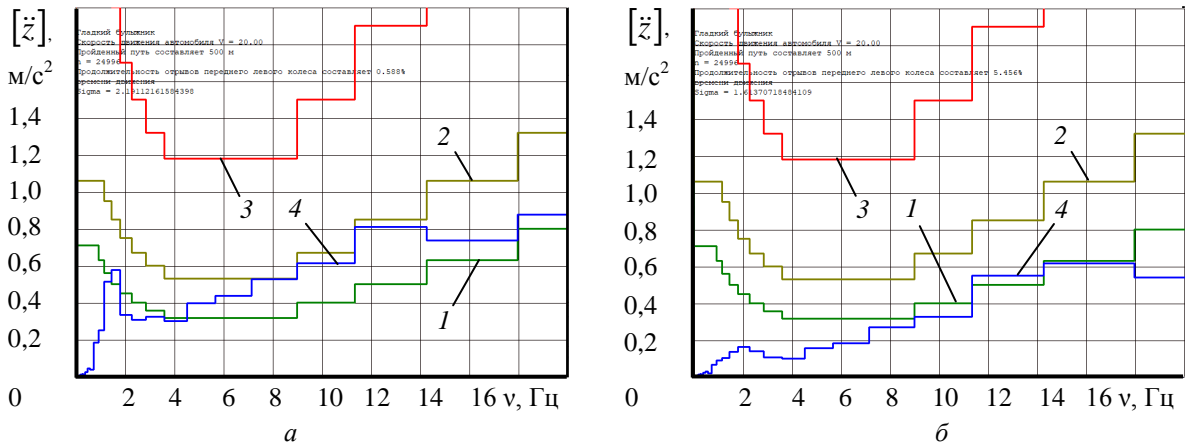


Рис. 4. Среднеквадратические вертикальные ускорения поддресоренной массы в третьоктавных полосах при движении по гладкому булыжнику со скоростью 72 км/ч:

1, 2, 3 – нормы для 1-го, 4-х, 8-ми часов езды; 4 – значения вертикальных среднеквадратических ускорений поддресоренной массы в третьоктавных полосах: а – классическая подвеска при  $\psi = 0,25$ ; б – подвеска с регулированием демпфирования при  $\psi_{max} = 0,25$

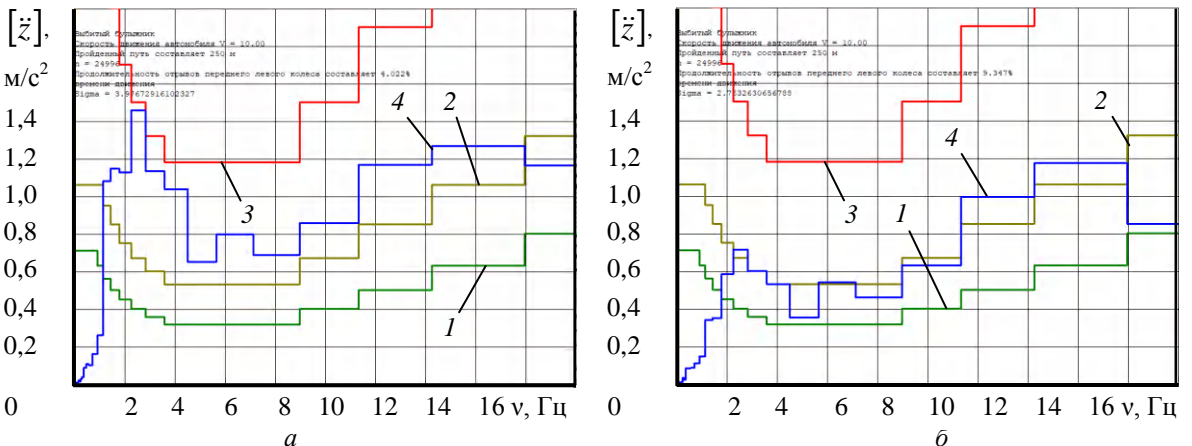


Рис. 5. Среднеквадратические вертикальные ускорения поддресоренной массы в третьоктавных полосах при движении по выбоитому булыжнику со скоростью 36 км/ч:

1, 2, 3 – нормы для 1-го, 4-х, 8-ми часов езды; 4 – значения вертикальных среднеквадратических ускорений поддресоренной массы в третьоктавных полосах: а – классическая подвеска при  $\psi = 0,25$ ; б – подвеска с регулированием демпфирования при  $\psi_{max} = 0,25$

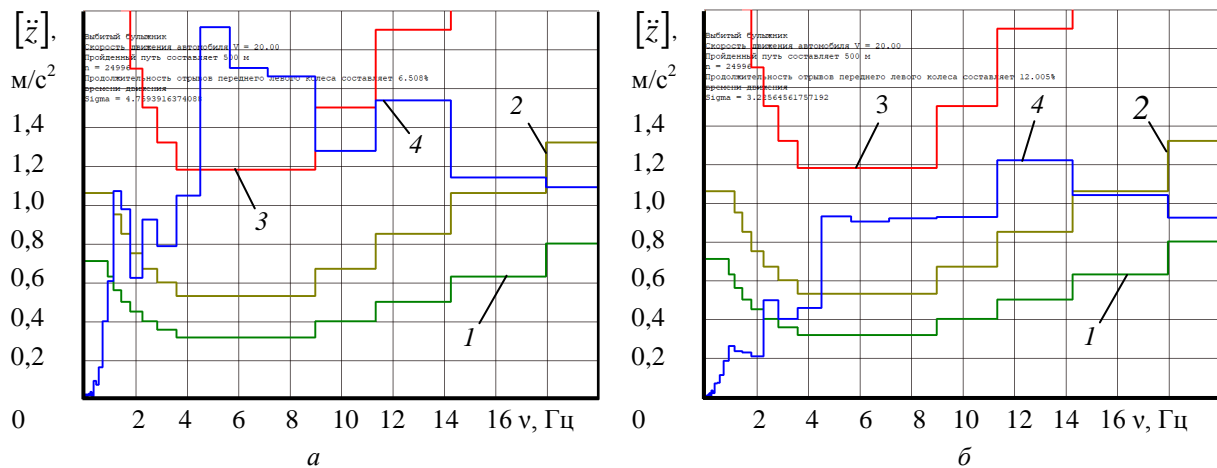


Рис. 6. Среднеквадратические вертикальные ускорения поддрессоренной массы в третьоктавных полосах при движении по выбитому булыжнику со скоростью 72 км/ч:

1, 2, 3 – нормы для 1-го, 4-х, 8-ми часов езды; 4 – значения вертикальных среднеквадратических ускорений поддрессоренной массы в третьоктавных полосах: а – классическая подвеска при  $\psi = 0,25$ ; б – подвеска с регулированием демпфирования при  $\psi_{\max} = 0,25$

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чернышов, К. В. Оптимальное управление демпфированием подвески на основе принципа максимума / К. В. Чернышов, В. В. Новиков, И. М. Рябов // Тракторы и с.-х. машины. – 2006. – № 2. – С. 13–15.

2. Динамика движения. Регулируемые подвески: учеб. пособие / К. В. Чернышов, И. М. Рябов, В. В. Новиков, А. В. Поздеев, А. М. Ковалев. ВолгоГТУ. – Волгоград, 2020. – 160 с.

3. Новиков, В. В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография / В. В. Новиков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов; ВолгоГТУ. – 2-е изд., испр. и доп. – М.; Вологда, 2021. – 384 с.

4. Чернышов, К. В. Теоретический анализ виброзащитных свойств одноопорной подвески при постоянном и регулируемом неупругом сопротивлении в цикле колебаний / К. В. Чернышов, В. В. Новиков, А. В. Поздеев // Грузовик. – 2022. – № 10. – С. 15–23.

5. Перспективные направления повышения демпфирующих свойств амортизаторов подвесок АТС / В. В. Новиков, А. В. Поздеев, К. В. Чернышов, Д. А. Чумаков // Грузовик. – 2022. – № 8. – С. 3–13.

6. Регулирование демпфирования подвески автомобиля в цикле колебаний / К. В. Чернышов, В. В. Новиков, А. В. Поздеев, И. А. Беляков // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ–2023) (г. Волгоград, 11–15 сентября 2023 г.): материалы мультиконф. В 4 т. Т. 4 : материалы докл. локальной науч.-техн. конф. «Управление в перспективных наземных транспортных системах» (УПНТС–2023) / редкол.: И. А. Каляев (отв. ред.), В. Г. Пешехонов, С. Ю. Желтов [и др.]; ФГБОУ ВО «Волгоградский гос. технический университет», Южный научный центр РАН, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН [и др.]. – Волгоград, 2023. – С. 102–105.

7. Новиков, В. В. Расчет систем поддрессоривания автотранспортных средств: учебник / В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев; под общ. ред. В. В. Новикова. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 316 с.

8. Пат. 230065 Российская Федерация, МПК F16F9/48 Адаптивный амортизатор / В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, И. А. Беляков. А. Р. Брунилина; ФГБОУ ВО ВолгоГТУ. – 2024.

9. Пат. 230709 Российская Федерация, МПК F16F9/48 Адаптивный амортизатор / В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, И. А. Беляков. А. Р. Брунилина; ФГБОУ ВО ВолгоГТУ. – 2024.

10. Адаптивный гидроамортизатор с улучшенным гашением колебаний кузова и колес / В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, И. А. Беляков // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт; ВолгоГТУ. – Волгоград, 2025. – № 4 (53). – С. 82–86.

11. Новиков, В. В. Эффективность гидравлических амортизаторов с разными алгоритмами регулирования сопротивления / В. В. Новиков, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, И. А. Беляков // Вестник машиностроения. – 2026. – № 5. – С. 355–363.

#### REFERENCES

1. Chernyshov, K.V. Optimal control of suspension damping based on the maximum principle / K.V. Chernyshov, V.V. Novikov, I.M. Ryabov // Tractors and Agricultural Machinery. – 2006. – No. 2. – Pp. 13–15.

2. Dynamics of Motion. Adjustable Suspensions: Textbook. Handbook / K.V. Chernyshov, I.M. Ryabov, V.V. Novikov, A.V. Pozdееv, and A.M. Kovalev. Volgograd State Technical University. – Volgograd, 2020. – 160 p.

3. Novikov, V. V. Vibration Protection Properties of Vehicle Suspensions: Monograph / V. V. Novikov, I. M. Ryabov, K. V. Chernyshov; Volgograd State Technical University. – 2nd edition, revised and expanded. – Moscow; Vologda, 2021. – 384 p.

4. Chernyshov, K.V. Theoretical analysis of vibration-proof properties of a single-support suspension with constant and adjustable inelastic resistance in the oscillation cycle / K.V. Chernyshov, V.V. Novikov, A.V. Pozdееv // Truck. – 2022. – No. 10. – pp. 15-23.

5. Promising directions for increasing the damping properties of shock absorbers of PBX suspensions / V.V. Novikov, A.V. Pozdееv, K.V. Chernyshov, D.A. Chumakov // Truck. – 2022. – No. 8. – pp. 3-13.

6. Regulation of damping of the car suspension in the oscillation cycle / K.V. Chernyshov, V.V. Novikov, A.V. Pozdееv, I.A. Belyakov // XVI All-Russian Multiconference on Control Problems (MKPU–2023) (Volgograd, September 11-15, 2023) : materials of the multiconference. In 4 volumes. Vol. 4 : materials of the report. local scientific and technical conference. Con-

ference "Management in Promising Land Transport systems" (UPNTS–2023) / editors: I. A. Kalyaev (editors), V. G. Peshekhonov, S. Yu. Zheltov [et al.]; Volgograd State Technical University, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Management Problems. V. A. Trapeznikova RAS [et al.]. Volgograd, 2023. pp. 102-105.

7. *Novikov, V.V.* Calculation of springing systems for motor vehicles: textbook / V.V. Novikov, K.V. Chernyshov, A.V. Pozdeev; under the general editorship of V. V. Novikov. – Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2024. – 316 p.

8. Pat. 230065 Russian Federation, IPC F16F9/48 Adaptive shock absorber / V.V. Novikov, K.V. Chernyshov, A.V. Pozdeev, I.A. Belyakov. A.R. Brunilina; Volgograd State Technical University. – 2024.

9. Pat. 230709 Russian Federation, IPC F16F9/48 Adaptive shock absorber / V.V. Novikov, K.V. Chernyshov, A.V. Pozdeev, I.A. Belyakov. A.R. Brunilina; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education VolgSTU. – 2024.

10. Adaptive hydroamortizer with improved damping of body and wheel vibrations / V. V. Novikov, K. V. Chernyshov, A.V. Pozdeev, I. A. Belyakov // Energy and resource saving: industry and transport; VolgSTU. – Volgograd, 2025. – No. 4 (53). – Pp. 82–86.

11. *Novikov V.V., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Belyakov I.A.* Efficiency of hydraulic shock absorbers with different algorithms for resistance regulation // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2026. – No. 5. – Pp. 355–363.

Статья поступила в редакцию 14.05.2026, доработана 17.05.2026, подписана в печать 18.05.2026

The article was submitted 14.05.2026, revised 17.05.2026, accepted for publication 18.05.2026

УДК 629.3.027.3

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-49-57

Научная статья  
Original article

*Д. В. Пан<sup>1</sup>, М. П. Малиновский<sup>1,2</sup>, И. Ф. Тихонов<sup>2</sup>, Д. Е. Мещеряков<sup>2</sup>*

### ПОЛУЧЕНИЕ УПРУГОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИСТОВОЙ РЕССОРЫ В ХОДЕ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

<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.** Проводится экспериментальное исследование жесткости листовой рессоры. Рассматривается методика проведения стендовых испытаний листовых рессор. Определяется упругая характеристика и жесткость экспериментального образца. Сравниваются экспериментальные данные с паспортными для данного изделия.

**Ключевые слова:** листовая рессора, подвеска автомобиля, упругий элемент, методика испытаний, эксперимент, упругая характеристика, жесткость рессоры

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

**Для цитирования:** Пан Д. В., Малиновский М. П., Тихонов И. Ф., Мещеряков Д. Е. Получение упругой характеристики листовой рессоры в ходе стендовых испытаний. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 49–57. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-49-57.

#### Информация об авторах:

**Дмитрий Владиславович Пан** – аспирант кафедры тягачей и амфибийных машин МАДИ

SPIN-код: 4298-2428

e-mail: dima.pan2013@yandex.ru

**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»

SPIN-код: 4513-8855

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

Scopus ID: 57193743128

e-mail: ntbmadi@gmail.com

**Игорь Федорович Тихонов** – научный сотрудник лаборатории подвески Испытательного центра продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

e-mail: igor.tikhonov@nami.ru

**Денис Евгеньевич Мещеряков** – канд. физ.-мат. наук, начальник управления стендовых испытаний ТС и их компонентов Испытательного центра продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

SPIN-код: 4796-9981

e-mail: d.meshcheryakov@nami.ru

**Вклад авторов:**

**Д. В. Пан** – анализ данных, интерпретация результатов, оформление материалов, написание статьи.

**М. П. Малиновский** – разработка общей концепции исследования, редактирование.

**И. Ф. Тихонов** – проведение эксперимента, сбор данных.

**Д. Е. Мещеряков** – разработка методологии эксперимента.

*D. V. Pan<sup>1</sup>, M. P. Malinovsky<sup>1,2</sup>, I. F. Tikhonov<sup>2</sup>, D. E. Meshcheriakov<sup>2</sup>*

**OBTAINING THE STIFFNESS CHARACTERISTICS  
OF A LEAF SPRING DURING BENCH TESTS**

<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.** An experimental study of leaf spring stiffness is conducted. A methodology for conducting bench tests of leaf springs is discussed. The elastic characteristics and stiffness of the experimental sample are determined. The experimental data are compared with the specifications for this product.

**Keywords:** leaf spring, vehicle suspension, elastic element, testing method, experiment, spring characteristic, spring stiffness

**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.

**For citation:** Pan D. V., Malinovsky M. P., Tikhonov I. F., Meshcheriakov D. E. Obtaining the stiffness characteristics of a leaf spring during bench tests. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport.* 2026; 2(55): 49–57. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-49-57.

**Information about the authors:**

**Dmitry V. Pan** – postgraduate student of the Department of Tractors and Amphibious Vehicles at MADI

SPIN-code: 4298-2428

e-mail: dima.pan2013@yandex.ru

**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”

SPIN- code: 4513-8855

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

e-mail: ntbmadi@gmail.com

**Igor F. Tikhonov** – researcher at the Suspension Laboratory of the Automotive Products Testing Center at the State Research Center of the Russian Federation FSUE “NAMI”

e-mail: igor.tikhonov@nami.ru

**Denis E. Meshcheriakov** – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Vehicle and Component Bench Testing Department of the Automotive Products Testing Center at the State Research Center of the Russian Federation FSUE “NAMI”

SPIN- code: 4796-9981

e-mail: d.meshcheryakov@nami.ru

**Contribution of the authors:**

**Dmitry V. Pan** – data analysis, result interpretation, material preparation, writing the article.

**Mikhail P. Malinovsky** – idea and methodology design, approval of the final version for publication.

**Igor F. Tikhonov** – conducting experiments, data collection.

**Denis E. Meshcheriakov** – experimental methodology design.

В конструкции подвесок современных транспортных средств широко распространено применение листовых рессор в качестве упругих элементов, снижающих динамические нагрузки, действующие на корпус при его движении по неровностям дороги. Опыт конструирования и эксплуатации рессорных подвесок показал важность применения аналитических методов расчета систем поддресоривания на этапе проектирования, чтобы конструкция отвечала требованиям обеспечения оптимальной плавности хода, устойчивости при прямолинейном движении и выполнении поворотов [1].

Жесткость рессор влияет на общую вибрацию грузового автомобиля [2], на перераспределение вертикальных реакций по осям при торможении [3] и при разгоне на прямолинейном участке [4], а также на устойчивость при повороте [5–7]. Наибольшее влияние на критическую скорость входа в поворот оказывает изменение жесткости передних рессор [8]. Поэтому при проектировании подвески приходится выбирать не только абсолютные значения жесткости рессор, но и необходимое соотношение между передней и задней осями, так как при неправильном выборе можно ожидать

ухудшения последствий эффекта галопирования, то есть увеличения продольно-угловых колебаний подрессоренной массы [9]. При увеличении жесткости рессор повышается коэффициент динамичности, при уменьшении – возрастает амплитуда колебаний подрессоренной массы, причем колебания происходят не со случайными частотами возмущающей силы, а с собственными частотами, которые также будут зависеть от жесткости упругого элемента [10]. При наличии балансирной подвески можно добиться уменьшения колебаний за счет увеличения базы балансирной тележки, не изменяя жесткость рессор [11].

Рессорной подвеске присущи такие недостатки, как большая масса упругого элемента и трение между листами [12]. Поэтому к упругой характеристике необходимо прибавить характеристику трения [13]. Рессора является более эффективной при меньшем трении между листами, меньшем весе и меньших габаритных размерах, однако при этом существует опасность усталостного разрушения листа, несущего наибольшую нагрузку [14].

Развитие технологий позволило использовать компьютерное моделирование для исследования работы рессор под действием динамических нагрузок [15–16]. Однако важно обратить внимание на тот факт, что результаты практических расчетов и конечно-элементного моделирования спра-

ведливы только при определенных допущениях, использование которых для некоторого ряда задач может оказывать существенное влияние на достоверность получаемых решений [17]. Работа рессоры связана со значительными нагрузками, поэтому важно учитывать накопление повреждений материала, способное привести к разрушению детали [18], что невозможно достоверно оценить без экспериментальных исследований [19–20]. При проведении испытаний конкретных образцов появляется возможность оценить их соответствие требованиям конструкции. В связи с объемами производства различных узлов и агрегатов машин особенно актуально проводить комплексные стендовые испытания для снижения риска брака и своевременного устранения несовершенств конструкции [21].

На универсальной электромеханической машине, расположенной в Лаборатории физико-механических свойств материалов Испытательного центра продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», была испытана листовая рессора подвески прицепа для легкового автомобиля грузоподъемностью 750 кг Autoflex-KNOTT 6X1356.001 (Z1J).

На основании технической документации, полученной производителем, а также визуального осмотра конструкции было составлено техническое описание рессоры, представленное в табл. 1.

Таблица 1

Техническое описание рессоры

№ п/п	Название раздела	
1	Общие сведения	
1.1	Наименование изделия	Autoflex-KNOTT 6X1356.001 (Z1J)
1.2	Средства идентификации и расположение идентификации на изделии	Товарный знак и артикул на коренном листе рессоры
1.3	Применяемость изделия	Рессора листовая для комплектации подвески прицепов с номинальной нагрузкой на ось 750 кгс
1.4	Внешний вид изделия	Дефекты механического происхождения на листах отсутствуют. Рессора покрыта антикоррозийной краской. Резинометаллические шарниры в ушках отсутствуют
2	Общие конструктивные характеристики	
2.1	Тип рессоры	Листовая
2.2	Количество листов рессоры	6
2.3	Масса рессоры, кг	10,9
2.4	Длина рессоры, мм	920,0±5,0
2.5	Длина переднего конца, мм	460,0±2,5
2.6	Стрела выгиба рессоры в свободном состоянии (без нагрузки), мм	149,0±5,0
2.7	Ширина конца рессоры, мм	45,0±1,0
2.8	Диаметр ушка рессоры, мм	28,0±1,0



Принцип работы машин заключается в деформации образцов с помощью нагружающего устройства и одновременном измерении силы, приложенной к образцу, и его деформации. Измерение силы производится путем преобразования нагрузки тензометрическим датчиком силы в пропорциональный электрический сигнал. Измерение и контроль скорости перемещения траверсы путем преобразования величины углового отклонения ротора электродвигателя посредством оптического преобразователя. Элек-

трические сигналы с датчиков силы и оптического преобразователя обрабатываются компьютерной системой управления, поставляемой совместно с пакетом программного обеспечения (ПО).

Для выбранного образца определен ряд контрольных параметров, которые характеризуют работоспособность рессоры и по которым сравниваются результаты измерений. Перечень этих параметров и их значений приведен в табл. 2.

Таблица 2

Контрольные параметры исследуемой рессоры

Параметр	Обозн.	Разм.	Значение
Остаточная деформация	$\delta_{\text{ост}}$	мм	0 (не допускается)
Нагрузка при осадке	$P_{\text{ос}}$	Н	6000
Контрольная нагрузка	$P_{\text{к}}$	Н	3675
Стрела выгиба при контрольной нагрузке	$H_{\text{к}}$	мм	$68 \pm 5,0$
Жесткость рессоры	$C$	Н/мм	$45,0 \pm 5,0\%$

Перед определением нагрузочных характеристик была проведена двукратная осадка рессоры до нагрузки  $P_{\text{ос}}$ , затем была измерена стрела выгиба рессоры в свободном состоянии (после снятия нагрузки), после этого выполнена контрольная (третья) осадка рессоры до нагрузки  $P_{\text{ос}}$ , и вновь измерено значение стрелы выгиба в свободном состоянии. Остаточная деформация определялась как разность измеренных значений стрелы выгиба в свободном состоянии после двукратной осадки и после контрольной осадки. По результатам данного этапа для рассматриваемой рессоры остаточная деформация не выявлена: образец был допущен к дальнейшим испытаниям.

При испытании листовая рессора постепенно нагружалась до максимальной нагрузки, равной  $P_{\text{ос}}$ , с последующей разгрузкой до нулевого значения. При этом фиксировалось значение результатов измерения прогиба под контрольной нагрузкой при нагрузке и разгрузке. Деформацию рессоры под контрольной нагрузкой  $f_{\text{к}}$  определяют с учетом гистерезиса упругой характеристики [22] как среднее арифметиче-

ское значение результатов измерений прогиба рессоры под контрольной нагрузкой при нагружении рессоры до  $P_{\text{ос}}$ , и прогиба под контрольной нагрузкой при последующей разгрузке рессоры.

На рис. 3 приведена схема закрепления рессоры на стенде. Под действующей нагрузкой  $P$  при помощи штангенрейсмаса производилось измерение высоты  $H_{\text{изм}}$  от точки опоры на плите до точки на поверхности пластины, закрепленной на оснастке и совмещенной с внутренней поверхностью коренного листа рессоры, где стрела выгиба максимальна и линия действия нагрузки проходит перпендикулярно. Величина стрелы выгиба рессоры  $H$  определялась как разность измеренного значения и высоты шарнирной опоры  $H_{\text{ш}}$ , которая равна 49 мм с учетом зазора между диаметром ушка и диаметром оси шарнира.

В табл. 3 представлены результаты измерений  $H_{\text{изм}}$ , стрелы выгиба  $H$  и измеренные штангенрейсмасом значения прогиба рессоры  $f$  для соответствующих нагрузок  $P$  при нагружении до  $P_{\text{ос}}$  и последующей разгрузке до нуля.

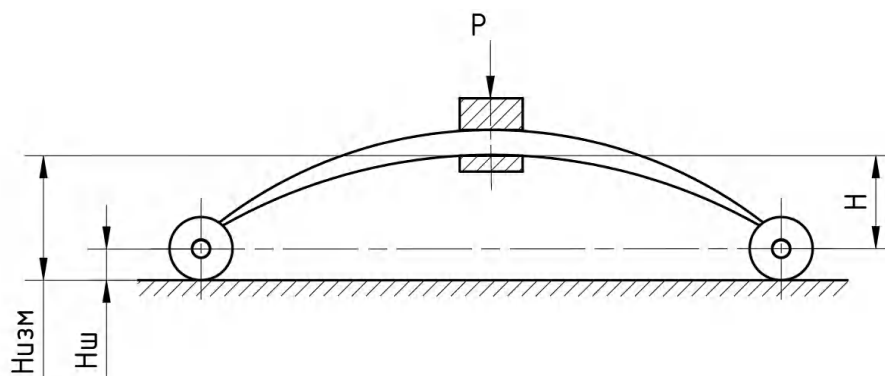


Рис. 3. Схема к определению стрелы выгиба рессоры под действующей нагрузкой

Таблица 3

**Значения параметров листовой рессоры при испытании**

Нагрузка $P$ , Н	Высота $H_{изм}$ , мм	Стрела выгиба $H$ , мм	Прогиб $f$ , мм
0	197,5	148,5	0
300	192,5	143,5	5,0
600	186,7	137,7	10,8
900	180,6	131,6	16,9
1200	174,4	125,4	23,1
1500	168,0	119,0	29,5
1800	162,0	113,0	35,5
2100	155,3	106,3	42,2
2400	148,3	99,3	49,2
2700	142,2	93,2	55,3
3000	135,6	86,6	61,9
3300	129,0	80,0	68,5
3675	120,5	71,5	77,0
4000	113,0	64,0	84,5
4300	107,0	58,0	90,5
4600	101,2	52,2	96,3
4900	95,4	46,4	102,1
5200	89,2	40,2	108,3
5500	83,0	34,0	114,5
5800	77,2	28,2	120,3
6000	73,5	24,5	124,0
5800	73,5	24,5	124,0
5500	74,8	25,8	122,7
5200	79,7	30,7	117,8
4900	86,1	37,1	111,4
4600	93,0	44,0	104,5
4300	99,8	50,8	97,7
4000	106,9	57,9	90,6
3675	115,3	66,3	82,2
3300	123,6	74,6	73,9

Окончание табл. 3

Нагрузка $P$ , Н	Высота $H_{изм}$ , мм	Стрела выгиба $H$ , мм	Прогиб $f$ , мм
3000	130,8	81,8	66,7
2700	137,6	88,6	59,9
2400	145,0	96,0	52,5
2100	151,5	102,5	46,0
1800	158,8	109,8	38,7
1500	165,6	116,6	31,9
1200	171,5	122,5	26,0
900	178,3	129,3	19,2
600	185,3	136,3	12,2
300	191,4	142,4	6,1
0	197,5	148,5	0

По экспериментальным значениям, полученным при нагружении и разгрузке листовой рессоры строится средняя линия упругой характеристики [23], по которой определяется значение де-

формации при контрольной нагрузке. Упругая характеристика рессоры представлена на рис. 4. На ней отмечена точка, соответствующая деформации при контрольной нагрузке.

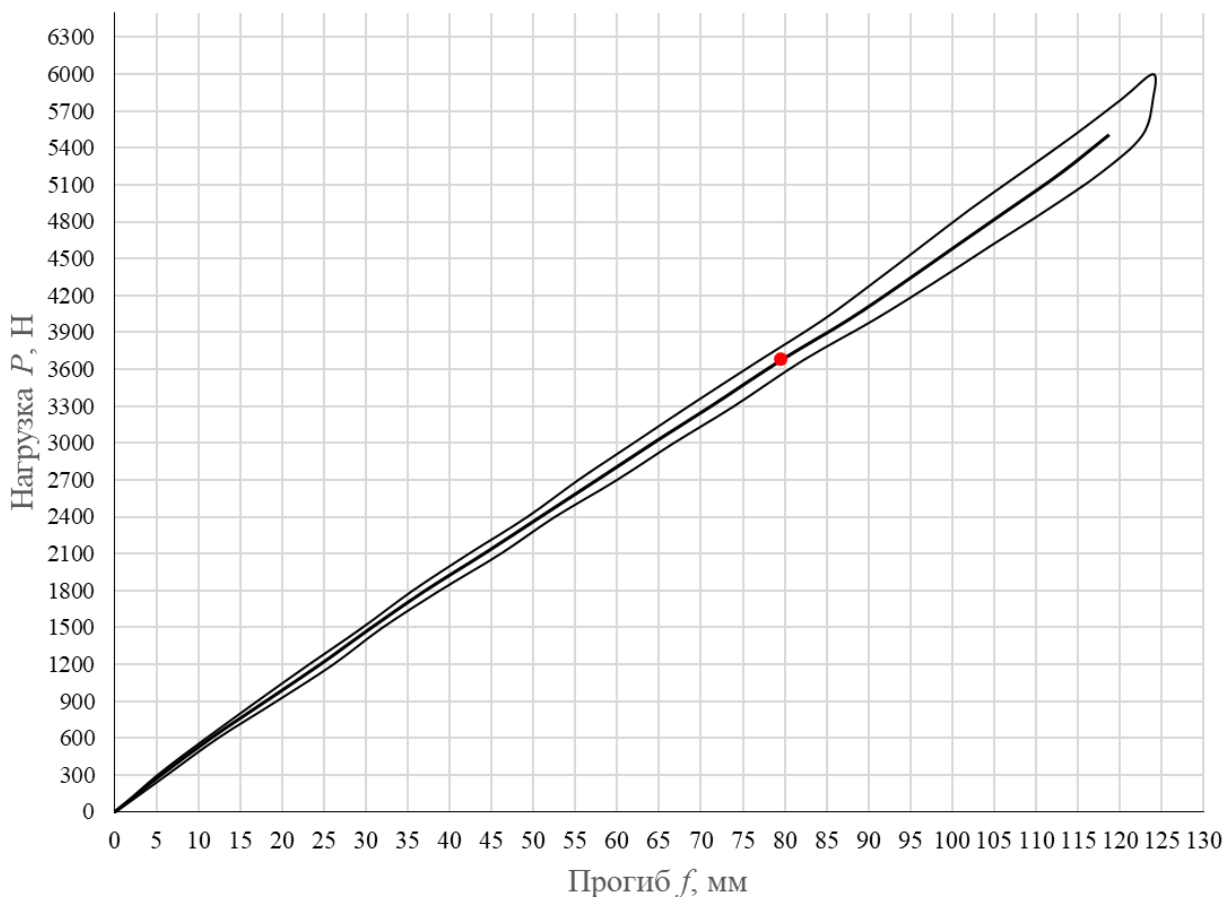


Рис. 4. Упругая характеристика рессоры Autoflex-KNOTT 6X1356.001 (Z1J)

В соответствии с методикой ГОСТ 33556-2015, жесткость рессоры определяют отношением приращения нагрузки  $\Delta P$  по средней линии

характеристики при прогибе  $\pm 25$  мм от положения, соответствующего контрольной нагрузке (то есть  $\Delta f = 50$  мм), к значению этого прогиба [24]:

$$C = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$

Соответствующие заданным прогибам значения нагрузок определяем методом линейной интерполяции по значениям из табл. 3:

$$\Delta P = 4780,2 - 2514,6 = 2265,6 \text{ Н};$$

$$C = \frac{2265,6}{50} = 45,31 \text{ Н/мм.}$$

В процессе выполнения эксперимента проведены стендовые испытания листовой рессоры, в результате которых была получена упругая характеристика листовой рессоры и определено фактическое значение жесткости исследуемого образца, вычисленное в соответствии с положениями, предписанными для выбранной методики испытаний. Анализ результатов показывает, что проведенные измерения подтверждают значение жесткости, указанное производителем для данного изделия.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пархиловский, И. Г.* Автомобильные листовые рессоры / И. Г. Пархиловский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
2. *Тольский, В. Е.* Расчетно-экспериментальное исследование вибрации грузового автомобиля / В. Е. Тольский, Г. В. Латышев // Труды НАМИ. – 2015. – № 262. – С. 4–15. – EDN UMTWPV.
3. *Тарасик, В. П.* Методика моделирования экстренного торможения автомобиля / В. П. Тарасик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 4(73). – С. 76–87. – DOI 10.53078/20778481\_2021\_4\_76. – EDN AXNNVJ.
4. *Марченко, С. Н.* Математическая модель для исследования устойчивости двухосного автомобиля с индивидуальным приводом при разгоне на прямолинейном участке / С. Н. Марченко, А. В. Келлер, Г. Д. Драгунов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2006. – № 11(66). – С. 102–106. – EDN KYWMMT.
5. *Мишута, Д. В.* Влияние конструктивных параметров автомобиля и его подвески на устойчивость и управляемость штабной машины / Д. В. Мишута, В. Г. Михайлов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 3(40). – С. 30–36. – DOI 10.53078/20778481\_2013\_3\_30. – EDN RRYLSR.
6. *Тарасик, В. П.* Моделирование режима испытаний «переставка» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля / В. П. Тарасик, О. В. Пузанова // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1(74). – С. 76–86. – DOI 10.53078/20778481\_2022\_1\_76. – EDN MMTLRZ.
7. *Тинт, Н. В.* Исследование влияния крена кузова на поперечную устойчивость грузового фургона при повороте / Н. В. Тинт, В. М. Алакин // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2022. – № 3(138). – С. 106–113. – DOI 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_106. – EDN SMGIQF.
8. *Кравец, В. Н.* Влияние конструктивных факторов на управляемость и устойчивость автобуса / В. Н. Кравец, Р. А. Мусарский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4(162) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. (Серия «Наземные транспортные системы»; т. 10). – С. 32–38. – EDN UKJFSH.
9. *Дубровский, А. Ф.* Выбор параметров подвески грузовых автомобилей «Урал» для повышения скорости движения по изношенным грунтовым дорогам / А. Ф. Дубровский, М. И. Абрамов, Ю. А. Сакулин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 10(171). – С. 66–75. – EDN TPNREB.
10. *Дьяков, И. Ф.* Основы поддрессирования транспортных средств / И. Ф. Дьяков, Ю. В. Моисеев // Вестник машиностроения. – 2019. – № 9. – С. 9–15. – EDN DRXVOG.
11. Создание новой автомобильной техники высокой проходимости для эксплуатации в условиях малых форм хозяйства в свете решения задач стратегии развития отечественного автопрома / Т. Д. Дзюценидзе, Ю. К. Есеновский-Лашков, М. А. Козловская [и др.] // Труды НАМИ. – 2011. – № 246. – С. 6–29. – EDN OISAQN.
12. *Ермаков, А. И.* Экспериментальное исследование рессор с вязкоупругими слоями / А. И. Ермаков // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 1(5). – С. 42–44. – EDN OIJYFT.
13. *Михайлов, В. Г.* О подходах моделирования движения и колебаний автомобиля при смешанной реальности / В. Г. Михайлов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2022. – № 4(34). – EDN WZFENA.
14. *Посметьев, В. И.* Оценка эффективности использования традиционных конструкций подвесок в специализированном автомобильном транспорте / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2022. – Т. 4, № 4(42). – С. 94–119. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-94-119. – EDN BBWFMH.
15. *Горобцов, А. С.* Построение статических характеристик зависимых подвесок автомобиля повышенной проходимости с помощью пространственной модели / А. С. Горобцов, С. К. Карцов, Ю. А. Поляков // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 1. – С. 10–13. – EDN QBMVAT.
16. *Комиссаров, А. И.* Многомассовая имитационная модель рессорно-балансирной подвески / А. И. Комиссаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2025. – № 3. – С. 11–20. – EDN VCKAZD.
17. *Пестренин, В. М.* Компьютерное моделирование напряженного состояния листовых рессор / В. М. Пестренин, И. В. Пестренина, Н. Ф. Таланцев // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2009. – № 3(29). – С. 74–81. – EDN KHNUSL.
18. *Пачурин, В. Г.* Оценка неоднородности структурно-механических свойств в раскатанных изделиях с клиновым профилем / В. Г. Пачурин, В. В. Галкин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 289. – EDN SZVMJJ.
19. *Артемов, И. И.* Экспериментальные исследования разрушения листовой рессоры транспортных средств / И. И. Артемов, В. В. Келасьев, А. А. Генералова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 2(10). – С. 145–155. – EDN KWKSHH.
20. *Рыков, С. П.* Экспериментальная оценка упруго-демпфирующих свойств листовых рессор. Модель, оборудование, методики и результаты эксперимента / С. П. Рыков, О. А. Рыкова // Механика XXI века. – 2021. – № 20. – С. 157–169. – EDN CUDJOU.
21. *Клубович, В. В.* Влияние точности инструмента и технологических режимов прокатки на эксплуатационные характеристики рессор / В. В. Клубович, В. С. Кравчук, В. А. Томило // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Промышленность. – 2008. – № 2. – С. 2–6. – EDN UYZXRZ.
22. *Рыкова, О. А.* Модель неупругого сопротивления в листовых рессорах как развитие эллиптического-степенной теории / О. А. Рыкова // Труды Братского государственного

университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2023. – Т. 1. – С. 258–265. – EDN GZHRUG.

23. Поляков, Ю. А. Моделирование динамической жесткости рессоры при анализе вибронгруженности автомобиля / Ю. А. Поляков // Грузовик. – 2017. – № 7. – С. 16–20. – EDN ZQPXPF.

24. Тихонова, А. С. Анализ математических моделей малолистовых рессор систем поддрессорования транспортных средств / А. С. Тихонова, П. С. Рубанов, И. В. Чичекин // Известия МГТУ МАМИ. – 2025. – Т. 19, № 2. – С. 100–110. – DOI 10.17816/2074-0530-684711. – EDN CUZXON.

## REFERENCES

1. Parkhilovsky, I.G. Automotive leaf springs. - 2nd ed., revised and enlarged. - Moscow: Mashinostroenie, 1978. - 232 p.

2. Tolsky, V.E. Computational and experimental study of truck vibration / V.E. Tolsky, G.V. Latyshev // Proceedings of NAMI. - 2015. - No. 262. - Pp. 4-15. - EDN UMTWPF.

3. Tarasik, V.P. Methodology for modeling emergency braking of a car / V.P. Tarasik // Bulletin of the Belarusian-Russian University. - 2021. - No. 4 (73). - Pp. 76-87. - DOI 10.53078/20778481\_2021\_4\_76. - EDN AXNNVJ.

4. Marchenko, S. N. Mathematical model for studying the stability of a two-axle vehicle with an individual drive during acceleration on a straight section / S. N. Marchenko, A. V. Keller, G. D. Dragunov // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering. - 2006. - No. 11 (66). - P. 102-106. - EDN KYWMMT.

5. Mishuta, D. V. Influence of the design parameters of the vehicle and its suspension on the stability and controllability of the staff car / D. V. Mishuta, V. G. Mikhailov // Bulletin of the Belarusian-Russian University. - 2013. - No. 3 (40). - P. 30-36. - DOI 10.53078/20778481\_2013\_3\_30. - EDN RRYLSR.

6. Tarasik, V. P. Modeling of the "rearrangement" test mode when assessing vehicle controllability and stability / V. P. Tarasik, O. V. Puzyanova // Bulletin of the Belarusian-Russian University. - 2022. - No. 1 (74). - P. 76-86. - DOI 10.53078/20778481\_2022\_1\_76. - EDN MMTLRZ.

7. Tint, N. V. Study of the influence of body roll on the lateral stability of a cargo van when turning / N. V. Tint, V. M. Alakin // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. - 2022. - No. 3 (138). - P. 106-113. - DOI 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_106. - EDN SMGIQF.

8. Kravets, V. N. Influence of design factors on controllability and stability of a bus / V. N. Kravets, R. A. Musarsky // Bulletin of the Volgograd State Technical University. Series: Ground transport systems. - 2015. - Vol. 10, No. 4(162). - P. 32-38. - EDN UKJFSH.

9. Dubrovsky, A. F. Selection of suspension parameters of Ural trucks to increase the speed of movement on worn out dirt roads / A. F. Dubrovsky, M. I. Abramov, Yu. A. Sakulin // Bulletin of the Orenburg State University. - 2014. - No. 10(171). - P. 66-75. - EDN TPNREB.

10. Dyakov, I. F. Fundamentals of Vehicle Suspension / I. F. Dyakov, Yu. V. Moiseyev // Bulletin of Mechanical Engineering. - 2019. - No. 9. - P. 9-15. - EDN DRXVOG.

11. Creation of New High-Capacity Automotive Equipment for Operation in Small Businesses in Light of Solving the Problems of the Domestic Automotive Industry Develop-

ment Strategy / T. D. Dzotsenidze, Yu. K. Yesenovsky-Lashkov, M. A. Kozlovskaya [et al.] // Proceedings of NAMI. - 2011. - No. 246. - P. 6-29. - EDN OISAQN.

12. Ermakov, A. I. Experimental study of springs with viscoelastic layers / A. I. Ermakov // Systems. Methods. Technologies. - 2010. - No. 1 (5). - P. 42-44. - EDN OIYFT.

13. Mikhailov, V. G. On approaches to modeling vehicle motion and vibrations in mixed reality / V. G. Mikhailov // Automobile. Road. Infrastructure. - 2022. - No. 4 (34). - EDN WZFENA.

14. Posmetyev, V. I. Evaluation of the efficiency of using traditional suspension designs in specialized automobile transport / V. I. Posmetyev, V. O. Nikonov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. - 2022. - Vol. 4, No. 4 (42). - Pp. 94-119. - DOI 10.34220/2311-8873-2022-94-119. - EDN BBWFMH.

15. Gorobtsov, A. S. Construction of static characteristics of dependent suspensions of an all-terrain vehicle using a spatial model / A. S. Gorobtsov, S. K. Kartsov, Yu. A. Polyakov // Science and Technology of Transport. - 2013. - No. 1. - Pp. 10-13. - EDN QBMVAT.

16. Komissarov, A. I. Multimass simulation model of a leaf-spring suspension / A. I. Komissarov // Machines and installations: design, development and operation. - 2025. - No. 3. - Pp. 11-20. - EDN VCKAZD.

17. Pestrenin, V. M. Computer modeling of the stress state of leaf springs / V. M. Pestrenin, I. V. Pestrenina, N. F. Talantsev // Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. - 2009. - No. 3 (29). - P. 74-81. - EDN KHNUSL.

18. Pachurin, V. G. Evaluation of Heterogeneity of Structural-Mechanical Properties in Rolled Products with a Wedge Profile / V. G. Pachurin, V. V. Galkin // Modern Problems of Science and Education. - 2014. - No. 5. - P. 289. - EDN SZVMJJ.

19. Artemov, I. I. Experimental Studies of Failure of Leaf Springs of Vehicles / I. I. Artemov, V. V. Kelasyev, A. A. Generalova // News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences. - 2009. - No. 2 (10). - P. 145-155. - EDN KWKSHH.

20. Rykov, S. P. Experimental Evaluation of the Elastic-Damping Properties of Leaf Springs. Model, Equipment, Methods, and Experimental Results / S. P. Rykov, O. A. Rykova // Mechanics of the XXI Century. - 2021. - No. 20. - Pp. 157-169. - EDN CUDJOU.

21. Klubovich, V. V. Influence of Tool Accuracy and Rolling Modes on the Performance Characteristics of Springs / V. V. Klubovich, V. S. Kravchuk, V. A. Tomilo // Bulletin of Polotsk State University. Series B: Applied Sciences. Industry. - 2008. - No. 2. - Pp. 2-6. - EDN UYZZRZ.

22. Rykova, O. A. Model of inelastic resistance in leaf springs as a development of the elliptic-power theory / O. A. Rykova // Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences. - 2023. - Vol. 1. - Pp. 258-265. - EDN GZHRUG.

23. Polyakov, Yu. A. Modeling of the dynamic stiffness of a spring in the analysis of vehicle vibration loading / Yu. A. Polyakov // Truck. - 2017. - No. 7. - Pp. 16-20. - EDN ZQPXPF.

24. Tikhonova, A. S. Analysis of mathematical models of small-leaf springs of vehicle suspension systems / A. S. Tikhonova, P. S. Rubanov, I. V. Chichekin // Bulletin of MSTU MAMI. - 2025. - V. 19, No. 2. - P. 100-110. - DOI 10.17816/2074-0530-684711. - EDN CUZXON.

Статья поступила в редакцию 20.04.2026, доработана 13.05.2026, подписана в печать 15.05.2026

The article was submitted 20.04.2026, revised 13.05.2026, accepted for publication 15.05.2026

УДК 625.7/8:621.924.93  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-58-65

Научная статья  
Original article

*А. В. Алимов*

**УСТАНОВКА НА БАЗЕ КОММУНАЛЬНОЙ МАШИНЫ  
ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ДОРОЖНОЙ РАЗМЕТКИ ПНЕВМОАБРАЗИВНЫМ МЕТОДОМ**

**Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия**

✉ Антон Витальевич Алимов, anton\_alimoff\_007@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена конструктивно-технологическая схема установки для удаления дорожной разметки пневмоабразивным методом. Установка размещается на стандартном шасси коммунальной машины и включает в себя компрессорный модуль, ресивер, бункер, систему сопел, защитно-вакуумную камеру, блок сепарации, пылеулавливатель и контейнер для отходов. Цель исследования состоит в разработке расчетной модели и методики испытаний, позволяющих оценивать производительность, удельный расход абразива, энергетические затраты, износ сопел и эффективность пылеулавливания при удалении разметочных материалов с асфальтобетонных и цементобетонных покрытий. В качестве определяющих параметров приняты давление сжатого воздуха, расход воздуха и абразива, геометрия сопел, расстояние от сопла до покрытия, угол атаки струи, скорость перемещения машины, гранулометрический состав и плотность абразива. Предложены зависимости для расчета кинетической энергии частиц, массового расхода воздуха через сопло, площади производимости, удельного расхода абразива, энергозатрат на единицу обработанной площади и скорости износа сопел. Методика испытаний предусматривает контроль остаточной площади разметки, глубины повреждения покрытия, массы рекуперированного абразива и концентрации пыли в рабочей зоне. Результаты работы предназначены для проектирования опытного образца и сопоставления пневмоабразивного удаления с фрезерованием, химическим воздействием и водоструйной обработкой.

**Ключевые слова:** дорожная разметка, демаркировка, пневмоабразивная обработка, коммунальная машина, сопловой блок, рекуперация абразива, пылеулавливание

**Благодарности:** выражаю благодарность своему научному руководителю Андрею Вячеславовичу Зызыкину за помощь и вклад при планировании исследования и составлению научной статьи. Также я очень благодарен университету СПбГАСУ, кафедре АДФ, своим коллегам и родителям за поддержку во время работы над рукописью.

**Финансирование:** статья опубликована за счет автора.

**Для цитирования:** Алимов А. В. Установка на базе коммунальной машины для удаления дорожной разметки пневмоабразивным методом. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 58–65. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-58-65.

**Информация об авторе:**

Антон Витальевич Алимов – аспирант СПбГАСУ  
e-mail: anton\_alimoff\_007@mail.ru

*A. V. Alimov*

**INSTALLATION BASED ON A MUNICIPAL MACHINE FOR REMOVING  
ROAD MARKINGS USING THE PNEUMATIC ABRASIVE METHOD**

**Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
Saint-Petersburg, Russia**

✉ Anton V. Alimov, anton\_alimoff\_007@mail.ru

**Abstract.** The paper considers a structural and technological scheme of a mobile unit for removing horizontal road markings by pneumatic abrasive treatment. The unit is mounted on a municipal vehicle chassis and includes a compressor module, receiver, abrasive hopper with a metering device, working nozzles, protective vacuum chamber, separation unit, dust collector and waste container. The purpose of the study is to develop a calculation model and a test procedure for estimating productivity, specific abrasive consumption, energy demand, nozzle wear and dust collection efficiency during the removal of marking materials from asphalt concrete and cement concrete pavements. The governing parameters are compressed air pressure, air and abrasive flow rates, nozzle geometry, nozzle-to-surface distance, jet attack angle, vehicle speed, particle size distribution and abrasive density. Equations are proposed for calculating particle kinetic energy, air mass flow through the nozzle, area productivity, specific abrasive consumption, energy consumption per treated area and nozzle wear rate. The test procedure includes control of residual marking area, pavement damage depth, recovered abrasive mass and dust concentration in the working zone. The results can be used for designing a prototype and comparing pneumatic abrasive removal with milling, chemical treatment and water blasting.

**Keywords:** road marking, marking removal, pneumatic abrasive treatment, municipal vehicle, nozzle unit, abrasive recovery, dust collection

**Acknowledgments:** i would like to express my gratitude to my supervisor, A. V. Zazykin, for his assistance and contribution in planning the research and writing the scientific article. I am also very grateful to SPbGASU, the Department of ADP, my colleagues, and my parents for their support during the writing process.

**Funding:** the article was published at the expense of the author.

**For citation:** Alimov A. V. Installation based on a municipal machine for removing road markings using the pneumatic abrasive method. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 2(55): 58–65. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-58-65.

**Information about the authors:**

Anton V. Alimov – postgraduate student at St. Petersburg State University  
e-mail: anton\_alimoff\_007@mail.ru

**Введение**

Дорожная разметка представляет из себя элемент технических средств организации дорожного движения, а ее геометрические, цветовые и эксплуатационные характеристики и свойства задаются нормативными документами [1–3]. В процессе эксплуатации дорог возникает потребность в удалении старой, временной или ошибочно нанесенной разметки. Причинами являются изменение схемы движения, ремонт покрытия, ликвидация временных полос, подготовка основания под новое маркировочное покрытие и устранение следов, создающих ложные зрительные ориентиры для водителей.

На практике применяют фрезерование, шлифование, гидроструйную обработку, химическое размягчение, маскирование и абразивоструйное воздействие. Фрезерование отличается высокой технологической простотой, но связано с риском образования борозд и остаточного контраста на покрытии. Гидроструйный способ уменьшает количество сухой пыли, однако требует водоснабжения, утилизации загрязненного стока и оборудования высокого давления. Химическое удаление ограничено требованиями экологической и производственной безопасности. Поэтому для дорожных работ пневмоабразивный метод представляет особый интерес, при котором разрушение слоя материала выполняется потоком твердых частиц, ускоренных сжатым воздухом.

Одной из проблем является то, что повышение давления и расхода абразива не всегда приводит к существенному (или хоть какому-то) увеличению производительности.

С увеличением напора струи возрастает износ сопел. При недостаточной интенсивности на дороге остается разметка, что требует повторного прохода. Следовательно, установка должна проектироваться как система с регули-

руемым воздействием, а не как набор разрозненных узлов.

Анализ технической документации показывает, что методы абразивоструйной подготовки поверхностей регламентированы для металлических оснований [8–10], однако применительно к удалению дорожной разметки с асфальтобетонных и цементобетонных покрытий остается недостаточно проработанной расчетная связка между параметрами сопел, расходом абразива, скоростью движения коммунальной машины, степенью удаления и повреждением покрытия.

Целью настоящей работы является разработка конструктивной схемы и расчетно-методической основы для мобильной установки удаления дорожной разметки пневмоабразивным методом на базе коммунальной машины. Для достижения цели решались следующие задачи: сформировать состав установки и требования к шасси; описать физическую модель ударно-эрозионного удаления разметки; предложить показатели производительности, энергозатрат, расхода абразива и износа сопел; разработать методику испытаний и критерии сравнения с традиционными технологиями.

**Материалы и методы**

В качестве объекта исследования рассматривается сменный технологический модуль, устанавливаемый на шасси коммунальной машины грузового класса. Базовая компоновка показана на рис. 1. Воздух от компрессорного модуля через ресивер и осушитель поступает в смеситель, где формируется газоабразивный поток.

Абразив подается из бункера через дозатор, после чего поток направляется в сопловой блок. Зона воздействия закрывается защитно-вакуумной камерой, которая ограничивает вынос пыли и обеспечивает сбор разрушенного материала.

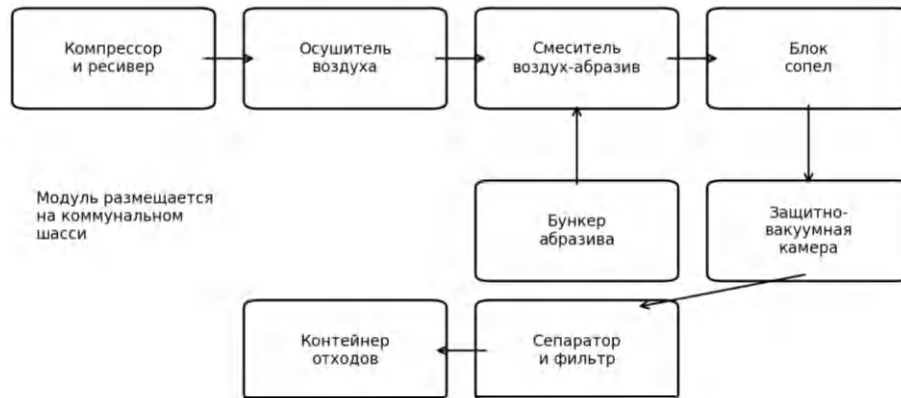


Рис. 1. Структурная схема установки для пневмоабразивного удаления дорожной разметки

К базовому шасси предъявляются требования по грузоподъемности, доступной мощности привода компрессора, устойчивости при заполненном бункере, возможности движения с малой технологической скоростью и размещению пылеулавливающего оборудования. Допустимая полезная нагрузка проверяется по условию:

$$G_{дон} \geq G_{мод} + G_{абр} + G_{отх} + G_{топл} + G_{оп} \quad (1)$$

где  $G_{дон}$  – допустимая полезная нагрузка шасси;  $G_{мод}$  – масса технологического модуля;  $G_{абр}$  – масса абразива в бункере;  $G_{отх}$  – масса накопленных отходов;  $G_{топл}$  – масса топлива или вспомогательных жидкостей;  $G_{оп}$  – масса персонала, инструмента и средств контроля.

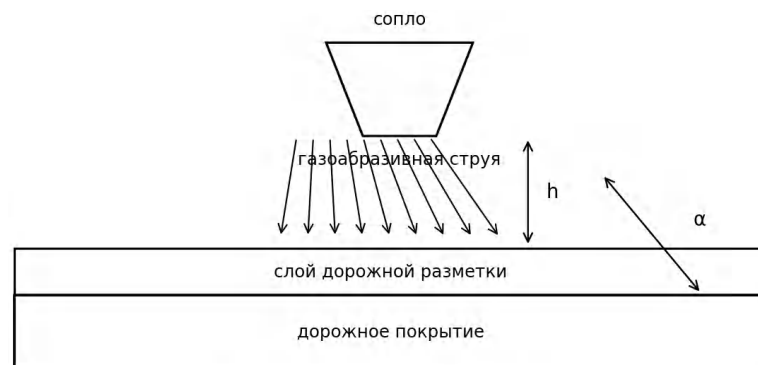
При использовании вала отбора мощности

или автономной силовой установки выполняется проверка энергетического баланса:

$$N_{пр} \geq N_{компр}/\eta_{пр} + N_{вак} + N_{всп} \quad (2)$$

где  $N_{пр}$  – доступная мощность привода;  $N_{компр}$  – мощность компрессора;  $\eta_{пр}$  – коэффициент полезного действия передачи;  $N_{вак}$  – мощность вакуумной системы;  $N_{всп}$  – мощность вспомогательных приводов.

Физическая схема взаимодействия газоабразивной струи с покрытием приведена на рис. 2. В расчете учитываются давление перед соплом  $P_0$ , диаметр сопла  $d_n$ , средний размер частиц  $d_p$ , плотность абразива  $\rho_a$ , скорость частиц  $v_p$ , расстояние от сопла до поверхности  $h$ , угол атаки  $\alpha$  и скорость перемещения машины  $v_m$ .



Параметры:  $p_0, d_n, d_p, \rho_a, v_p, \alpha, h, v_m$

Рис. 2. Расчетная схема воздействия газоабразивной струи на слой дорожной разметки

Для частицы абразива, приближенно принимаемой сферической, масса определяется выражением:

$$m_p = \rho_a \cdot \pi \cdot d_p^3 / 6 \quad (3)$$

а ее кинетическая энергия перед ударом о поверхность равна:

$$E_h = m_p \cdot v_p^2 / 2 \quad (4)$$

где  $m_p$  – масса частицы;  $\rho_a$  – плотность абразива;  $d_p$  – средний диаметр частицы;  $v_p$  – скорость частицы;  $E_p$  – кинетическая энергия частицы.

Для потока частиц мощность абразивного воздействия можно записать как:

$$P_a = m_a \cdot v_p^2 / 2 \quad (5)$$

где  $P_a$  – мощность абразивного воздействия;  $m_a$  – массовый расход абразива. Эта зависимость показывает, что изменение скорости частиц влияет на энергию воздействия квадратично, поэтому геометрия сопла и режим истече-

$$m_{air} = C_d \cdot A_t \cdot P_0 \cdot \sqrt{\gamma / (R \cdot T_0)} \cdot (2 / (\gamma + 1))^{((\gamma + 1) / (2(\gamma - 1)))} \quad (6)$$

где  $C_d$  – коэффициент расхода сопла;  $A_t$  – площадь критического сечения;  $p_0$  – абсолютное давление перед соплом;  $\gamma$  – показатель адиабаты воздуха;  $R$  – газовая постоянная воздуха;  $T_0$  – температура воздуха перед соплом. При дальнейшем проектировании соплового блока следует сравнивать цилиндрические, сужающиеся и сужающе-расширяющиеся сопла, поскольку распределение скоростей частиц влияет на равномерность удаления слоя [12; 13].

Площадная производительность установки рассчитывается через ширину рабочей зоны и скорость перемещения машины:

$$Q_h = 3600 \cdot b \cdot v_m \cdot k_o \quad (7)$$

где  $Q_h$  – производительность,  $m^2/ч$ ;  $b$  – фактическая ширина обработки;  $v_m$  – скорость движения машины,  $m/с$ ;  $k_o$  – коэффициент, учитывающий перекрытие проходов, повороты, дозоправку абразива и технологические останки.

Удельный расход абразива без учета возврата определяется выражением:

$$g_a = m_a / Q_s \quad (8)$$

где  $g_a$  – удельный расход абразива,  $кг/м^2$ ;  $Q_s$  – производительность в  $m^2/с$ . При наличии сепарации и повторного использования пригодной фракции расход нового абразива составит

$$q_{a,new} = q_a \cdot (1 - \eta_r) \quad (9)$$

где  $\eta_r$  – коэффициент рекуперации пригодного абразива.

Удельные энергетические затраты на обработку единицы площади определяются как:

$$es = N_{компр} + N_{вак} + N_{всп} / Q_h \quad (10)$$

где  $es$  – удельные энергетические затраты,  $кВт \cdot ч/м^2$ .

ния воздуха являются ключевыми факторами эффективности процесса.

Массовый расход воздуха через сопло при критическом истечении оценивается по формуле газовой динамики

Для контроля соплового блока вводится показатель скорости износа

$$I_d = (d_t - d_0) / t \quad (11)$$

где  $I_d$  – скорость увеличения диаметра сопла;  $d_0$  – исходный диаметр;  $d_t$  – диаметр после наработки  $t$ . Рост диаметра сопла увеличивает расход воздуха и изменяет структуру струи, поэтому измерение фактического диаметра должно входить в протокол испытаний.

Эффективность пылеулавливания оценивается по снижению концентрации пыли на входе и выходе фильтрующего блока:

$$\eta_f = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \quad (12)$$

где  $\eta_f$  – эффективность пылеулавливания;  $C_{in}$  и  $C_{out}$  – концентрации пыли до и после фильтра. Контроль воздуха рабочей зоны необходимо выполнять с учетом требований ГОСТ 12.1.005-88, а операции подготовки поверхности и удаления старых покрытий должны рассматриваться в системе требований безопасности окрасочных и подготовительных работ [5; 6].

#### Методика испытаний

Методика испытаний строится как серия проходов по образцам покрытия с заранее нанесенной разметкой. Для исключения смешения факторов отдельно испытываются асфальтобетонное и цементобетонное основания, а также разные типы разметочных материалов: лакокрасочные материалы, термопластик, холодный пластик и материалы с микростеклошариками. Перед испытанием фиксируются толщина слоя разметки, состояние покрытия, влажность поверхности, температура воздуха и параметры абразива.



Выходные показатели:  $K_r$ ,  $Q_h$ ,  $q_a$ ,  $es$ ,  $I_d$ ,  $\eta_r$ ,  $\eta_f$

Рис. 3. Последовательность получения и обработки экспериментальных данных

Основные факторы испытаний приведены в табл. 1. Значения уровней задаются после выбора компрессора, сопел и типа абразива; запол-

нение таблицы паспортными или измеренными параметрами исключает подмену экспериментальных данных расчетными допущениями.

Таблица 1

Факторы, влияющие на качество и производительность удаления разметки

Фактор	Обозначение	Единица	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Давление перед соплом	$p_0$	МПа			
Диаметр сопла	$d_n$	мм			
Расход абразива	$\dot{m}_a$	кг/мин			
Расстояние до покрытия	$h$	мм			
Угол атаки струи	$\alpha$	град			
Скорость машины	$v_m$	м/мин			
Фракция абразива	$d_p$	мм			

Качество удаления разметки определяется по остаточной площади слоя после прохода. Степень удаления вычисляется по формуле

$$K_r = ((A_0 - A_{res}) / A_0) \cdot 100 \% \quad (13)$$

где  $A_0$  – исходная площадь размеченного участка;  $A_{res}$  – остаточная площадь видимого разметочного материала после обработки. Остаточная площадь может определяться по фотофиксации с одинаковыми условиями освещения и последующей бинаризацией изображения либо по инструментальному контролю яркости и световозвращения в соответствии с методами контроля дорожной разметки [2].

Повреждение покрытия оценивается по изменению микропрофиля. Для этого до и после прохода выполняется профилометрия контрольных полос. В качестве показателя может использоваться средняя глубина повреждения

$S_d$  или максимальная глубина локального дефекта  $S_{max}$ .

Для дорожного применения предпочтителен режим, обеспечивающий высокое  $K_r$  при минимальных  $S_d$  и  $S_{max}$ .

#### Результаты расчетного анализа

Результатом расчетной части является набор показателей, которые позволяют сравнивать режимы работы установки без привязки к конкретной марке коммунальной машины. Для одного прохода протокол должен включать давление, фактический расход воздуха, расход абразива, скорость машины, ширину обработки, диаметр сопла до и после серии, массу поданного и рекуперированного абразива, массу отходов, концентрации пыли до и после фильтра, остаточную площадь разметки и глубину повреждения покрытия.

Таблица 2

Расчетные и измеряемые показатели одного испытательного режима

Показатель	Обозначение	Формула / метод	Единица	Источник данных
Степень удаления	$K_r$	$(A_0 - A_{res}) / A_0 \cdot 100$	%	фотофиксация, контроль разметки
Производительность	$Q_h$	$3600 \cdot b \cdot v_m \cdot k_o$	м <sup>2</sup> /ч	расчет по скорости и ширине
Удельный расход абразива	$q_a$	$\dot{m}_a / Q_s$	кг/м <sup>2</sup>	взвешивание
Расход нового абразива	$q_{a,new}$	$q_a \cdot (1 - \eta_f)$	кг/м <sup>2</sup>	сепарация и взвешивание
Удельные энергозатраты	$e_s$	$(N_{компр} + N_{вак} + N_{всп}) / Q_h$	кВт·ч/м <sup>2</sup>	паспорт, измерение мощности
Скорость износа сопла	$I_d$	$(d_t - d_0) / t$	мм/ч	измерение диаметра
Эффективность фильтра	$\eta_f$	$(C_{in} - C_{out}) / C_{in}$	доля	измерение концентрации пыли

Для выбора режима обработки предлагается использовать безразмерный интегральный показатель технологической пригодности

$$\Psi = K_r / [q_a \cdot e_s \cdot (1 + S_d^*)] \quad (14)$$

где  $\Psi$  – относительный критерий пригодности режима;  $K_r$  – степень удаления в долях единицы;

qa – удельный расход абразива; es – удельные энергозатраты; Sd\* – нормированная глубина повреждения покрытия. Показатель не заменяет отдельные требования к качеству удаления и безопасности, но позволяет ранжировать режимы при лабораторной обработке соплового блока.

Если два режима обеспечивают одинаковую степень удаления, предпочтительным считается

режим с меньшим расходом нового абразива, меньшим повреждением покрытия и меньшей концентрацией пыли после фильтрации. При наличии рекуперации необходимо различать полный расход абразива в контуре и расход свежего абразива, поскольку именно второй показатель влияет на эксплуатационные затраты и массу перевозимых материалов.

Таблица 3

Сравнительная характеристика методов удаления дорожной разметки

Метод	Механизм воздействия	Сильная сторона	Ограничение	Контролируемый риск
Фрезерование / шлифование	механическое срезание слоя	простота и высокая скорость	повреждение покрытия, остаточный след	глубина резания
Гидроструйная обработка	разрушение струей воды высокого давления	меньше сухой пыли	сток и сложное оборудование	утилизация загрязненной воды
Химическое удаление	размягчение связующего	локальная обработка	химическая безопасность, время выдержки	остатки реагента
Пневмоабразивная обработка	ударная эрозия частицами	регулируемая интенсивность воздействия	пыль, шум, износ сопел	фильтрация и повреждение покрытия
Тепловые методы	локальное нагревание и отделение слоя	малое механическое воздействие	стоимость оборудования, риск перегрева	термическое влияние на покрытие

Сравнение показывает, что пневмоабразивный метод не должен оцениваться только по площади обработки за час. Для дорожных условий определяющими являются остаточный контраст удаленной разметки, повреждение покрытия, санитарные параметры, масса отходов и стоимость расходных материалов. В отличие от фрезерования, где основной рабочий параметр связан с глубиной механического срезания, пневмоабразивный способ позволяет изменять энергию частиц, плотность потока и время воздействия. Это дает возможность подобрать режим для тонких лакокрасочных слоев и более толстых пластиковых материалов, но требует точного дозирования абразива и контроля расстояния до поверхности.

#### Обсуждение

Главным ограничением предлагаемой установки является пылеобразование. При разрушении разметочного материала в рабочую зону могут поступать частицы абразива, минерального наполнителя покрытия, фрагменты связующего и стеклошарики. Поэтому защитно-вакуумная камера и фильтрующий блок являются обязательными элементами, а не дополнительной опцией. При проектировании следует проверять герметичность камеры по неровному покрытию, устойчивость разрежения при дви-

жении и способность сепаратора отделять пригодную фракцию от пыли.

Вторым ограничением является износ сопел. При работе с электрокорундом и стальной дробью износ может быстро изменить расходные характеристики. Это приводит к расхождению между заданным и фактическим режимом обработки. Для опытного образца рекомендуется вводить регламент контроля диаметра сопел после заданной наработки, а также использовать материалы сопел с повышенной абразивной стойкостью.

Выбор абразива должен учитывать не только удаляющую способность, но и санитарные, экологические и эксплуатационные факторы. Кварцевый песок технологически доступен, однако его применение связано с риском образования пыли, содержащей свободный диоксид кремния. Купрошлак и никельшлак требуют контроля гранулометрического состава и химических показателей. Электрокорунд обеспечивает высокую режущую способность, но увеличивает стоимость расходного материала. Стальная дробь перспективна при замкнутом контуре рекуперации, однако требует защиты элементов установки от ударного износа и магнитной сепарации.

Оптимизация установки должна выполняться в нескольких направлениях: подбор сопел по

равномерности факела; стабилизация расхода абразива; автоматическое поддержание расстояния до покрытия; повышение доли рекуперированной фракции; снижение подсоса наружного воздуха через уплотнения защитной камеры; контроль остаточной разметки машинным зрением. В перспективе возможно применение адаптивного режима, при котором скорость машины и расход абразива изменяются по результатам оценки остаточного контраста разметки за рабочим органом.

### Выводы

1. Предложена компоновочная схема мобильной пневмоабразивной установки для удаления дорожной разметки, включающая компрессорный модуль, дозатор абразива, сопловой блок, защитно-вакуумную камеру, сепаратор, пылеулавливатель и контейнер отходов.

2. Сформирована расчетная модель процесса, связывающая кинетическую энергию частиц, расход воздуха, расход абразива, производительность обработки, энергозатраты и износ сопел.

3. Разработана методика испытаний, предусматривающая контроль степени удаления разметки, повреждения покрытия, расхода абразива, эффективности рекуперации и концентрации пыли в рабочей зоне.

4. Показано, что для дорожного применения пневмоабразивный метод должен оцениваться по совокупности показателей: производительность, остаточная разметка, повреждение покрытия, расход нового абразива, энергозатраты и эффективность пылеулавливания.

5. Первоочередными направлениями дальнейшей разработки являются экспериментальная проверка сопловых блоков, выбор абразива с учетом санитарных требований, повышение коэффициента рекуперации и автоматизация поддержания технологического режима.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 51256-2018. Технические средства организации дорожного движения. Разметка дорожная. Классификация. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2018.
2. ГОСТ 32952-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Разметка дорожная. Методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2019.
3. ГОСТ Р 52289-2019. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств. – М.: Стандартинформ, 2019.
4. ГОСТ Р 50597-2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допус-

тимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. – М.: Стандартинформ, 2017.

5. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартинформ, 2002.

6. ГОСТ 12.3.005-75. Система стандартов безопасности труда. Работы окрасочные. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2005.

7. ГОСТ Р 52381-2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. – М.: Стандартинформ, 2020.

8. ISO 8504-2:2019. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface preparation methods. Part 2: Abrasive blast-cleaning. Geneva: ISO, 2019.

9. ISO 11126-6:2018. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Specifications for non-metallic blast-cleaning abrasives. Part 6: Iron and steel slags. Geneva: ISO, 2018.

10. Pike, A. M., Miles J.D. Effective Removal of Pavement Markings. Washington, DC: Transportation Research Board, 2013. doi: 10.17226/22474.

11. Pike, A. M. Bommanayakanahalli B. Development of a Pavement Marking Life Cycle Cost Tool // Transportation Research Record. 2018. Vol. 2672, no. 12. P. 148-157. doi: 10.1177/0361198118758012.

12. Gerhardter, H., Prieler R., Zausinger S., Hochenauer C. Investigating the advantages of Laval blasting nozzles in combination with injector-type sandblasters using efficient numerical methods // Surface and Coatings Technology. 2022. Vol. 445. Article 128699. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128699.

13. Brieskorn, L., Stuercke U., Valeika D., Hintze W. Performance study on vacuum suction blasting by force and velocity measurements of the abrasive flow // Discover Mechanical Engineering. 2024. Vol. 3. Article 13. doi: 10.1007/s44245-024-00044-9.

14. Zulkarnain, I., Mohamad Kassim N.A., Syakir M.I., Abdul Rahman A., Md Yusuff M.S., Mohd Yusop R., Keat N.O. Sustainability-Based Characteristics of Abrasives in Blasting Industry // Sustainability. 2021. Vol. 13, no. 15. Article 8130. doi: 10.3390/su13158130.

15. Liang, W., Liu P., Wang S. An efficient non-destructive separation method of road marking from asphalt pavement by microwave directional heating // Road Materials and Pavement Design. 2023. Vol. 24. doi: 10.1080/14680629.2022.2117073.

### REFERENCES

1. GOST R 51256-2018. Traffic control devices. Road marking. Classification. Technical requirements. Moscow: Standartinform, 2018.
2. GOST 32952-2014. Automobile roads of general use. Road marking. Test methods. Moscow: Standartinform, 2019.
3. GOST R 52289-2019. Traffic control devices. Rules of application of road signs, markings, traffic lights, road fences and guide devices. Moscow: Standartinform, 2019.
4. GOST R 50597-2017. Automobile roads and streets. Requirements for the operational condition admissible under traffic safety conditions. Test methods. Moscow: Standartinform, 2017.
5. GOST 12.1.005-88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air. Moscow: Standartinform, 2002.
6. GOST 12.3.005-75. Occupational safety standards system. Painting works. General safety requirements. Moscow: Standartinform, 2005.

7. GOST R 52381-2005. Abrasive materials. Grain size and grain composition of grinding powders. Grain composition control. Moscow: Standartinform, 2020.

8. ISO 8504-2:2019. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface preparation methods. Part 2: Abrasive blast-cleaning. Geneva: ISO, 2019.

9. ISO 11126-6:2018. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Specifications for non-metallic blast-cleaning abrasives. Part 6: Iron and steel slags. Geneva: ISO, 2018.

10. Pike A.M., Miles J.D. Effective Removal of Pavement Markings. Washington, DC: Transportation Research Board, 2013. doi: 10.17226/22474.

11. Pike A.M., Bommanayakanahalli B. Development of a Pavement Marking Life Cycle Cost Tool. Transportation Research Record, 2018, vol. 2672, no. 12, pp. 148-157. doi: 10.1177/0361198118758012.

12. Gerhardter H., Prieler R., Zausinger S., Hochenauer C.

Investigating the advantages of Laval blasting nozzles in combination with injector-type sandblasters using efficient numerical methods. Surface and Coatings Technology, 2022, vol. 445, article 128699. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128699.

13. Brieskorn L., Stuercke U., Valeika D., Hintze W. Performance study on vacuum suction blasting by force and velocity measurements of the abrasive flow. Discover Mechanical Engineering, 2024, vol. 3, article 13. doi: 10.1007/s44245-024-00044-9.

14. Zulkarnain I., Mohamad Kassim N.A., Syakir M.I., Abdul Rahman A., Md Yusuff M.S., Mohd Yusop R., Keat N.O. Sustainability-Based Characteristics of Abrasives in Blasting Industry. Sustainability, 2021, vol. 13, no. 15, article 8130. doi: 10.3390/su13158130.

15. Liang W., Liu P., Wang S. An efficient non-destructive separation method of road marking from asphalt pavement by microwave directional heating. Road Materials and Pavement Design, 2023, vol. 24. doi: 10.1080/14680629.2022.2117073.

Статья поступила в редакцию 15.05.2026, доработана 20.05.2026, подписана в печать 22.05.2026

The article was submitted 15.05.2026, revised 20.05.2026, accepted for publication 22.05.2026

УДК 629.3.027.3:620.173

DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-65-79

Научная статья  
Original article

*А. Г. Столбов<sup>1</sup>, В. В. Григорьев<sup>1</sup>, А. Н. Шумакова<sup>1</sup>,  
Д. Е. Мещеряков<sup>1</sup>, А. Л. Эйдельман<sup>1</sup>, М. П. Малиновский<sup>1,2</sup>*

## ОСОБЕННОСТИ ВАЛИДАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ СТОЕК СТАБИЛИЗАТОРА ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

<sup>1</sup> ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

✉ Михаил Павлович Малиновский, ntbmadi@gmail.com

**Аннотация.** Стойки стабилизаторов являются шарнирными элементами подвески, которые соединяют концы штанги стабилизатора поперечной устойчивости с колесами транспортного средства через рычаги подвески, амортизаторы или другие элементы шасси. Подвеска автомобиля должна обеспечивать плавность хода, безопасность движения и устойчивость в поворотах, поэтому все компоненты должны подвергаться соответствующим валидационным испытаниям, в том числе и стойки стабилизаторов.

**Ключевые слова:** стойки стабилизатора, устойчивость, валидация, стендовые испытания

**Для цитирования:** Столбов А. Г., Григорьев В. В., Шумакова А. Н., Мещеряков Д. Е., Эйдельман А. Л., Малиновский М. П. Особенности валидационных испытаний стоек стабилизатора поперечной устойчивости легкового автомобиля. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 65–79. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-65-79.

### Информация об авторах:

**Алексей Глебович Столбов** – инженер-исследователь лаборатории подвески Испытательного центра продукции автомобилестроения, аспирант ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»  
e-mail: alexey.stolbov@nami.ru

**Владимир Вадимович Григорьев** – главный специалист сектора компоновочных решений специальных транспортных средств ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»  
e-mail: vladimir.grigoriev@nami.ru

**Анна Николаевна Шумакова** – начальник отдела моделирования прочности и жесткости центра «Численный анализ и виртуальная валидация» ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»  
e-mail: anna.shumakova@nami.ru

**Денис Евгеньевич Мещеряков** – канд. физ.-мат. наук, начальник управления управления стендовых испытаний ТС и их компонентов Испытательного центра продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»  
SPIN-код: 4796-9981  
e-mail: d.meshcheryakov@nami.ru

**Александр Львович Эйдельман** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Испытательного центра продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

e-mail: alexander.eidelman@nami.ru

**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»

SPIN-код: 4513-8855

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

Scopus ID: 57193743128

e-mail: ntbmadi@gmail.com

**Вклад авторов:**

**А. Г. Столбов** – проведение экспериментальных исследований, сбор и анализ данных.

**В. В. Григорьев** – разработка методологии и общей концепции исследования.

**А. Н. Шумакова** – аналитический и численный расчет, интерпретация результатов.

**Д. Е. Мещеряков** – организация экспериментальных исследований.

**А. Л. Эйдельман** – проведение экспериментальных исследований, сбор и анализ данных.

**М. П. Малиновский** – написание статьи, редактирование.

*A. G. Stolbov<sup>1</sup>, V. V. Grigoryev<sup>1</sup>, A. N. Shumakova<sup>1</sup>*

*D. E. Meshcheryakov<sup>1</sup>, A. L. Eidelman<sup>1</sup>, M. P. Malinovsky<sup>1,2</sup>*

**FEATURES OF VALIDATION TESTS OF PASSENGER CAR STABILIZER BAR LINKS**

<sup>1</sup> Federal State Unitary Enterprise “Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute” (FSUE “NAMI”), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow automobile and road construction state technical university (MADI), Moscow, Russia

✉ Mikhail P. Malinovsky, ntbmadi@gmail.com

**Abstract.** Stabilizer links are the hinged suspension components that connect the ends of the stabilizer bar to the vehicle's wheels via the suspension arms, shock absorbers, or other chassis components. A vehicle's suspension must ensure a smooth ride, safe handling, and cornering stability, so all components, including stabilizer links, must undergo appropriate validation testing.

**Keywords:** anti-roll bar links, stability, validation, bench testing

**For citation:** Stolbov A. G., Grigoryev V. V., Shumakova A. N., Meshcheryakov D. E., Eidelman A. L., Malinovsky M. P. Features of validation tests of passenger car stabilizer bar links. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 2(55): 65–79. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-65-79.

**Information about the authors:**

**Alexey G. Stolbov** – research engineer at the Suspension Laboratory of the Automotive Product Testing Center, postgraduate student at the State Research Center of the Russian Federation FSUE “NAMI”

e-mail: alexey.stolbov@nami.ru

**Vladimir V. Grigoryev** – chief specialist of the Special Vehicle Layout Solutions Sector at the State Research Center of the Russian Federation FSUE “NAMI”

e-mail: vladimir.grigoriev@nami.ru

**Anna N. Shumakova** – head of the Department of Strength and Stiffness Modeling at the Numerical Analysis and Virtual Validation Center at the State Research Center of the Russian Federation FSUE “NAMI”

e-mail: anna.shumakova@nami.ru

**Denis E. Meshcheryakov** – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Vehicle and Component Bench Testing Department of the Automotive Products Testing Center at the State Research Center of the Russian Federation FSUE “NAMI”

SPIN-code: 4796-9981

e-mail: d.meshcheryakov@nami.ru

**Alexander L. Eidelman** – PhD in Technical Sciences, leading researcher of the Automotive Products Testing Center at the State Research Center of the Russian Federation FSUE “NAMI”

e-mail: alexander.eidelman@nami.ru

**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”

SPIN-code: 4513-8855

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

Scopus ID: 57193743128

e-mail: ntbmadi@gmail.com

**Contribution of the authors:**

**Alexey G. Stolbov** – conducting experiments, data collection and analysis.

**Vladimir V. Grigoryev** – idea development and methodology design.

**Anna N. Shumakova** – analytical calculations and CAE simulation, result interpretation.

**Denis E. Meshcheryakov** – experimental research organization.

**Alexander L. Eidelman** – conducting experiments, data collection and analysis.

**Mikhail P. Malinovsky** – writing the article, final approval of the version for publication.

В теории поддрессирования внешнее кинематическое возбуждение, передающееся на несущую систему через колеса от дорожного полотна, эффективно снижается упругими и демпфирующими элементами, а силовое возмущение, действующее непосредственно на несущую систему в процессе подъемов и спусков, разгонов и торможений, а также криволинейного движения нивелируется стабилизатором поперечной устойчивости [1], который представляет собой специальное упругое устройство, состоящее из стержня и стоек. Стержень закреплен в резиновых опорах на раме или кузове, а концы стабилизатора через стойки шарнирно соединены с мостом, рычагами или демпфирующими элементами подвески [2].

Стабилизатор поперечной устойчивости применяется не только на легковых автомобилях [3], но и на легких автобусах (например, Isuzu) [4] и грузовиках [5], тяжелых многоосных колесных шасси [6], в том числе во вторичном поддрессировании кабины [7], на карьерных самосвалах [8], спецавтотранспорте с жидкотекучим грузом [9] и пожарно-спасательных автомобилях [10], на гоночных автомобилях [11–13] и даже мотовездеходах [14]. Конструкция транспортных средств постоянно совершенствуется, в настоящее время перспективными считаются механические стабилизаторы с регулируемой жесткостью [15] и со ступенчатой характеристикой [16], а также активные стабилизаторы поперечной устойчивости (АСПУ), например, гидравлического [17], электромеханического (за счет перемещения верхней опоры пружины) [18] и электромагнитного [19] типа. В случае отсутствия механического стабилизатора, как на большинстве автобусов, применяют пневматические стабилизаторы [20], адаптивные [21], полуактивные [22] или активные подвески [23], а на электробусах – систему динамической стабилизации за счет управления тягой [24].

К деталям, входящим в состав автомобильной подвески, предъявляются все более жесткие требования по надежности и ресурсу, особенно с точки зрения возможности их прогнозирования. Стабилизатор поперечной устойчивости работает в условиях сложного напряженного состояния, характеризуемого изгибом и чистым кручением его отдельных составляющих участ-

ков [25], при этом напряжение кручения может достигать 55 МПа [26]. По результатам дорожных испытаний транспортных средств категорий М1, М2, N1, N3 на автополигоне ФГУП «НАМИ» одним из характерных выявленных дефектов являлась поломка торсиона стабилизатора поперечной устойчивости [27].

На безопасность существенно влияют и не поддаются самодиагностике шарнирные соединения шаровых опор и стоек стабилизатора. Критический износ шарнирных соединений рулевых наконечников, шаровых опор, стоек стабилизатора поперечной устойчивости приводит к разъединению шарнира, нарушению положения колеса в колесной арке и моментальному изменению траектории движения без возможности ее контролировать [28].

Критерием замены стоек стабилизатора, как правило, является нарушение герметичности шаровой опоры [29]. Большая часть дефектов шаровых шарниров в эксплуатации связана с появлением посторонних шумов, а именно скрипов и стуков. По результатам многолетней эксплуатации автомобилей «Lada Vesta» выявлено, что наибольшее число рекламаций приходится именно на нижние шарниры стоек стабилизатора из-за близкого расположения к дорожному полотну. На нижний шарнир попадает значительное количество пыли, воды, дорожных реагентов и прочего, что приводит к его деградации. Характерными признаками потери герметичности является деградация смазки и наличие ржавчины на сфере шарнира [30]. После эксплуатации в зимний период коррозионные очаги возникают на всех деталях стабилизатора поперечной устойчивости [31].

Актуальность данного исследования обусловлена также тем фактом, что стабилизаторы поперечной устойчивости входят в перечень товаров, ввоз которых в Россию запрещен или ограничен согласно четвертому пакету санкций ЕС от 15.03.2022 г. [32], при этом они подлежат обязательной сертификации согласно ТР ТС 018/2011 и ГОСТ Р 53835-2010 [33].

#### **Конструктивные особенности стоек стабилизатора**

В зависимости от кинематики подвески, конструкция стойки стабилизатора поперечной устойчивости (далее – стабилизатор) либо вос-

принимает и передает большие усилия при малых углах работы своих шарниров, либо работает при сниженных нагрузках, но увеличенных углах работы шарниров. В то же время, стойка должна быть максимально легкой и технологичной в изготовлении. Чтобы обеспечить эти требования, проводятся расчеты [34; 35] и компьютерное моделирование работы изделия в эксплуатационных режимах [36; 37], проверяется возможность топологической оптимизации конструкции [38]. Следующим шагом разработки обычно являются стендовые и дорожные испытания прототипов или деталей первого съема с оснастки, в том числе исследование резиновых опор стабилизатора [39]. Испытания подвесок в целом, а также отдельных их элементов и деталей проводятся с целью оценки

их надежности (в основном безотказности, долговечности и ремонтпригодности) [40]. Далее полученные результаты сопоставляются с результатами компьютерного моделирования и расчетов.

Современные серийные конструкции стоек стабилизатора имеют корпус из стали [41], алюминия, конструкционного пластика или их комбинации [42; 43]. Шарниры преимущественно используются двух видов: резиновые сайлент-блоки или сферические шарниры.

В рамках работы были проведены исследование стоек со стальным корпусом и сферическими шарнирами, а также построенной на их базе удерживающей тяги подвески (рис. 1). Корпуса шарниров соединяются со стержнем при помощи контактной электросварки.

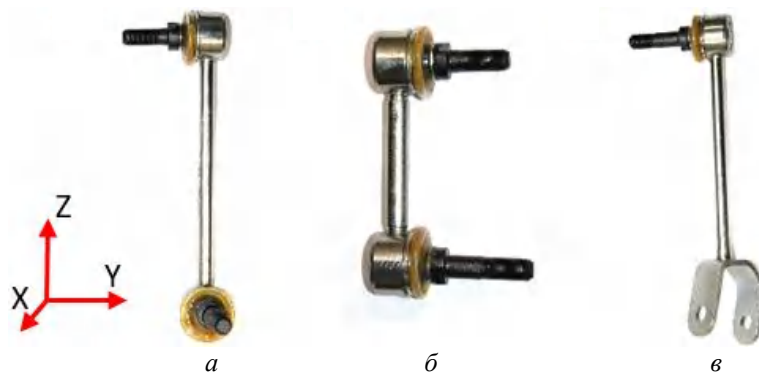


Рис. 1. Объекты исследования:  
а – стойка переднего стабилизатора; б – стойка заднего стабилизатора; в – шарнирная тяга

Валидационные испытания производителей стоек стабилизаторов обычно включают проверку размеров и резьбы, испытания шарниров, испытания корпуса, испытания на воздействие окружающей среды (климатические, озоновое старение, влияние влаги, испытания на коррозионную стойкость). Для сферических шарниров проводятся испытания на момент сопротивления при качании и вращении шарового пальца, сила вырыва и выдавливания шарового пальца из корпуса шарнира, остаточную деформацию вкладыша при нагружении осевой силой, твердость, качество термообработки и прочностные свойства шарового пальца и вкладыша, ресурсные испытания.

Важным видом проверки конструкции является испытание стержня на устойчивость и сопоставление полученных значений с рабочими нагрузками. Это связано с особенностью таких конструкций, где при обеспечении больших рабочих углов шарнира появляется экс-

центриситет между осью стержня и центром шара пальца (рис. 2). Несмотря на небольшие значения эксцентриситета, порядка 3...6 мм, критическая сила потери устойчивости может снизиться вследствие действия возникающего изгибающего момента.

#### Расчетные методы оценки устойчивости

Стойку стабилизатора можно упрощенно представить в виде шарнирно закрепленного с обоих концов стержня [44; 45].

Простейший расчет на потерю устойчивости стержня можно провести аналитически. Сила, при которой происходит потеря устойчивости стержня, называемая критической силой, определяется по формуле Эйлера:

$$P_k = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2},$$

где  $E$  – модуль упругости материала стержня,  $I$  – минимальный момент инерции поперечного сечения стержня,  $l$  – длина стержня,  $\mu$  – коэффициент, зависящий от способа закрепления.

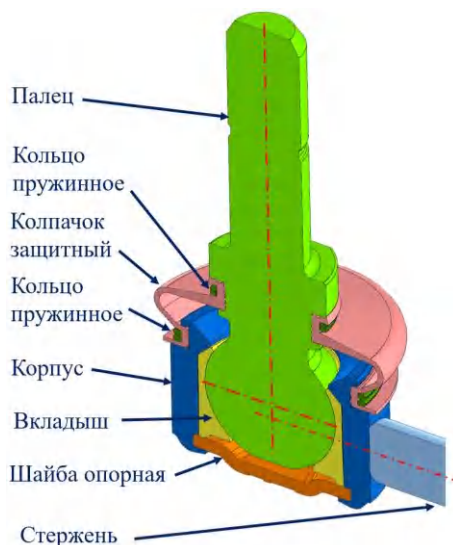


Рис. 2. Конструкция шарнира испытываемых стоек стабилизатора

Однако формула Эйлера справедлива не для всех стержней, находящихся под сжимающей нагрузкой и подверженных потере устойчивости. В ряде случаев применение этой формулы дает значение критической силы, в несколько раз превышающее значение силы, при котором происходит потеря устойчивости при испытаниях. В таких случаях потеря устойчивости сопровождается не только упругой, но и пластической деформацией стержня.

Возможность применения формулы Эйлера для стержня зависит от его гибкости, рассчитываемой по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{\mu l}{i},$$

где  $i$  – наименьший радиус инерции поперечного сечения стержня;  $\mu$  – коэффициент, зависящий от способа закрепления.

Пределы применимости формулы Эйлера описываются следующим неравенством:

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{пц}}},$$

где  $\sigma_{пц}$  – это предел пропорциональности материала.

Для стойки стабилизатора переднего  $\lambda = 60$ , заднего  $\lambda = 42$ , в то время как для стержней из материала стоек стабилизатора гибкость должна иметь значение не менее 99, чтобы линейный расчет на потерю устойчивости давал корректный результат.

Экспериментально было установлено, что стержни малой гибкости теряют несущую способность не по причине потери устойчивости, а по причине достижения опасных напряжений в сечении стержня, равных пределу прочности или пределу текучести в зависимости от того, является материал стержня хрупким или нет. Стержни высокой гибкости теряют устойчивость при напряжениях в сечении, соответствующих критической силе, полученной по формуле Эйлера.

Стержни средней гибкости, к которым относятся и рассматриваемые стойки стабилизатора, теряют устойчивость при напряжениях в сечении, меньших, чем предел текучести, и больших, чем предел пропорциональности материала, причем зависимость напряжений в сечении от гибкости стержня носит характер, близкий к линейному [46].

Графическая интерпретация зависимости напряжений в стержне в момент потери устойчивости от гибкости стержня представлена на рис. 3.

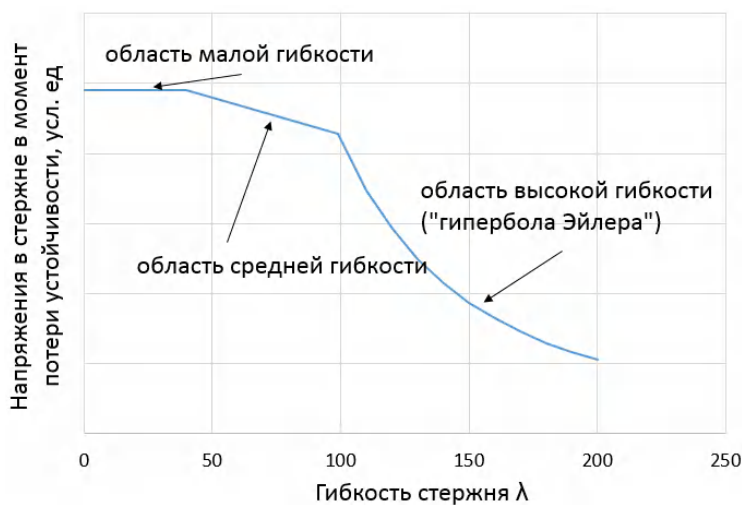


Рис. 3. Зависимости напряжений в стержне в момент потери устойчивости от гибкости стержня

Напряжения в момент потери устойчивости для стержней средней гибкости описываются эмпирической формулой Тетмайера – Ясинского

$$\sigma_{\kappa} = a - b\lambda,$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от материала. Зная напряжения в стержне и его площадь, можно вычислить критическую силу.

Также было проведено численное моделирование испытаний стоек стабилизатора на потерю устойчивости. Линейный анализ при этом дает неконсервативные результаты, совпадающие с полученными по формуле Эйлера, поэтому был проведен нелинейный анализ потери устойчивости.

В расчете учитывались геометрические нелинейности, упругопластическое поведение материала, поскольку в идеальном случае стойка из пластичного материала будет сжиматься, а не терять устойчивость, а также смещение оси приложения нагрузки относительно оси симметрии стержня.

Форма потери устойчивости стойки стабилизатора переднего приведена на рис. 4.



Рис. 4. Суммарные перемещения в стойке переднего стабилизатора после потери устойчивости

### Натурные испытания

Несмотря на развитие методов численного моделирования и расчета, оценка продольной устойчивости стоек стабилизатора автомобиля не может быть полностью сведена к аналитическим и вычислительным методам. Конструктивные особенности стоек: применение сферических шарниров, эксцентриситет центра сферы относительно оси стержня, а также технологические отклонения при производстве приводят к усложнению реального напряженно-деформированного состояния элемента. В этих условиях расчетные модели позволяют получить лишь прогнозируемую оценку параметров устойчивости и требуют экспериментального подтверждения, которое играет существенную роль в валидации расчетов конструктивных решений [47].

В настоящем разделе приведена методика проведения испытаний и с обобщенным анализом результатов.

Цель проведения эксперимента сводится к определению продольной устойчивости стоек стабилизатора и шарнирных тяг подвески транспортного средства для подтверждения результатов расчетного моделирования и соответствия заданным техническим требованиям. Также были определены характеристики продольной жесткости при нагружении до расчетных эксплуатационных нагрузок. Объекты исследования (образцы) представлены на рис. 1.

Испытания по определению продольной устойчивости и жесткости исследуемых компонентов в полном объеме проводилось в испытательном центре продукции автомобилестроения ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» на стенде Schenck PVTN-20 с электромеханическим приводом, обеспечивающем квазистатическое нагружение. Для закрепления образцов на стенде были спроектированы и изготовлены специальные кронштейны (рис. 5).

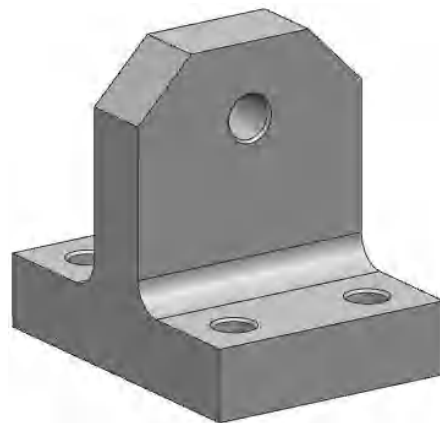


Рис. 5. Т-образный кронштейн

Измерение деформаций исследуемых образцов осуществлялось с использованием индуктивных датчиков перемещения типа 1-WA/50mm-L с диапазоном 0–50 мм и погрешностью  $\pm 0,1$  %. Прикладываемое усилие контролировалось при помощи силоизмерительного датчика фирмы «Schенck», которое было предварительно протарировано с использованием тензорезистивного датчика силы НВМ U10М с диапазоном измерений 0–50 кН и погрешностью  $\pm 0,04$  %. Сбор и регистрация данных осуществлялись с использованием системы НВМ МХ840В с ПО catmanAP V5.4.2, ко-

торая обеспечивает непрерывную синхронную запись показаний датчиков. Все применяемые средства измерений имели актуальную поверку на период проведения испытаний, что обеспечивало достоверность и воспроизводимость полученных результатов.

В соответствии с поставленной целью исследования была сформирована методика проведения испытаний, направленная на определение характеристик продольной жесткости и параметров продольной устойчивости стоек стабилизатора и шарнирных тяг. Общий вид испытательной установки показан на рис. 6.

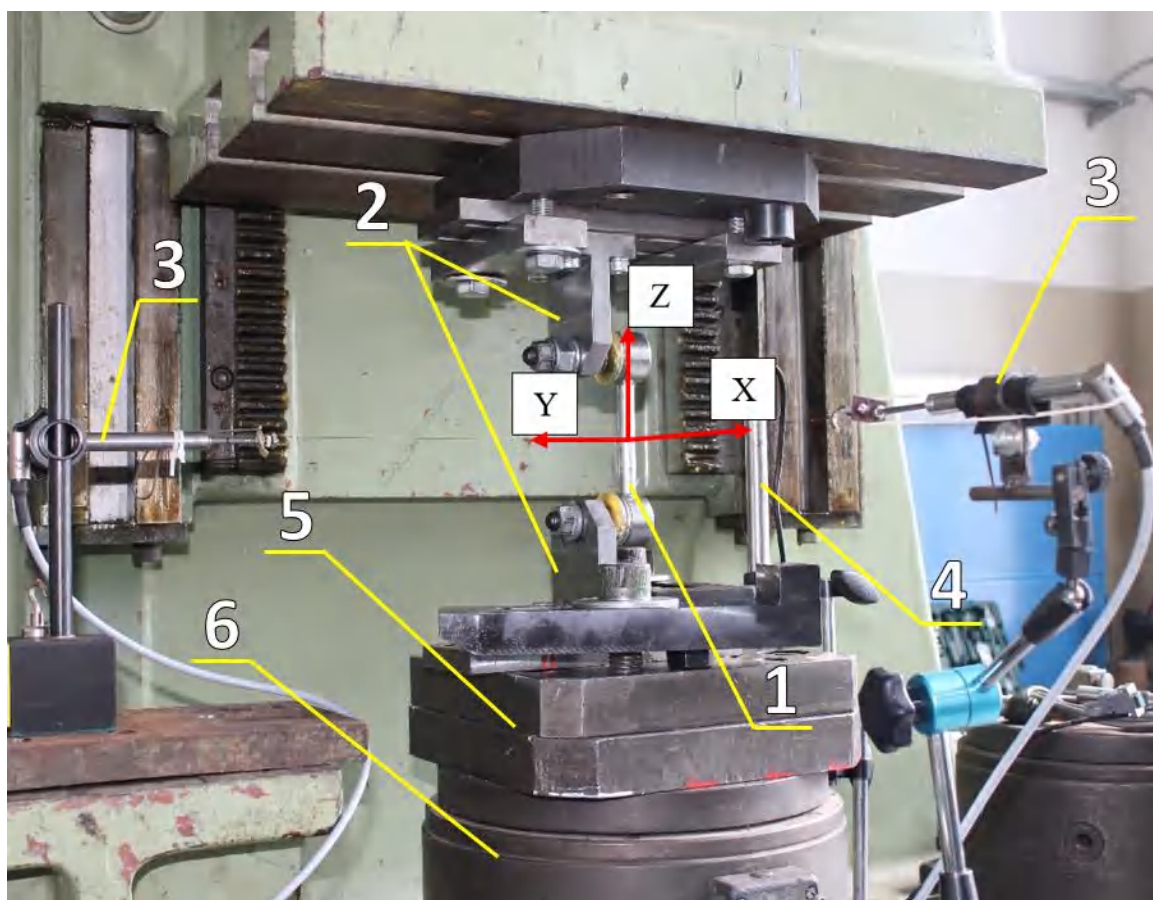


Рис. 6. Общий вид испытательной установки

При испытаниях образец 1 закреплялся на испытательном стенде с помощью специальных кронштейнов 2. При установке с помощью отвеса контролировалась вертикальность установки стоек. По осям X и Y установлены датчики перемещений 3. Штоки датчиков соединены с образцом с помощью тонкой проволоки диаметром 0,1 мм, которая закреплена на середине стержня стойки. По оси Z размещен датчик перемещений 4, который измерял вертикальное перемещение нагружающей головки 5.

Контроль прикладываемого к объекту испытаний усилия осуществлялся с помощью датчика силы 6.

После предварительного обжатия до расчетной нагрузки проводится испытание по определению характеристики продольной жесткости образца. Непрерывно в ходе нагружения измеряются и регистрируются показания датчика силы и трех датчиков перемещений, установленных взаимно перпендикулярно. Заключительным этапом испытаний является нагру-

жение образца до достижения предельной нагрузки, при которой происходит необратимая потеря продольной устойчивости стержней стоек стабилизаторов и шарнирных тяг.

На рис. 7 представлены результаты по оп-

ределению характеристик продольной жесткости образцов. В целях соблюдения требований конфиденциальности на всех графиках нагрузки представлены в условных единицах вместо реальных значений.

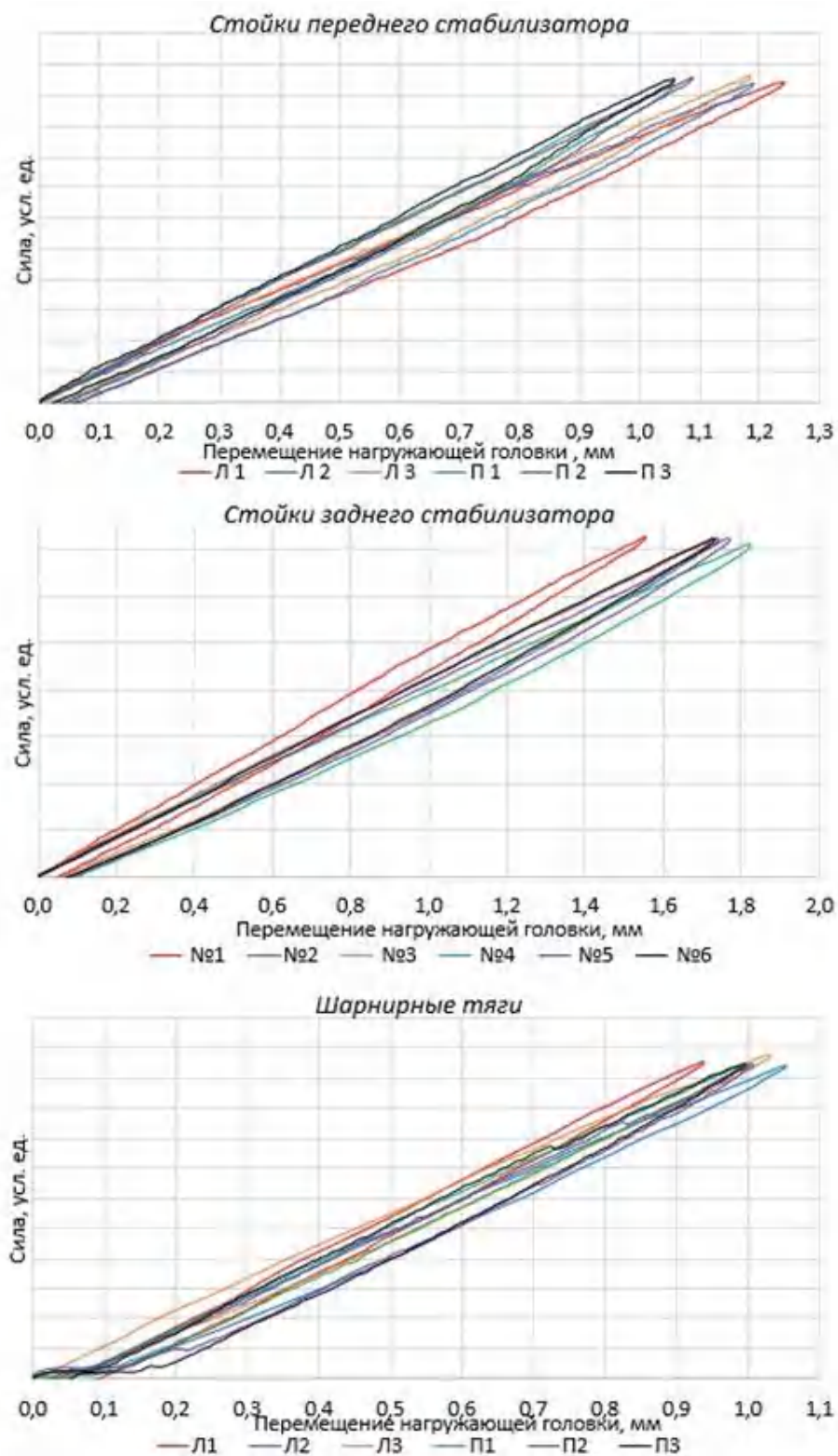


Рис. 7. Характеристики продольной жесткости образцов

Полученные экспериментально зависимости силы от перемещения по оси Z свидетельствуют о работе компонентов в зоне упругой деформации при заданном диапазоне эксплуатационных нагрузок, а наличие гистерезиса указывает на потери энергии, связанные с трением и относительными перемещениями в сферических шарнирах [48].

На рис. 8 представлены зависимости усилия от перемещения также по оси Z, полученные при определении характеристик продольной устойчивости стоек переднего стабилизатора.

Начало потери устойчивости для группы образцов в среднем происходит при усилении 5

усл. ед, соответствующем вертикальной деформации стойки 1,2 мм. При указанном усилии заканчивается зона линейной деформации, это происходит плавно и при средней величине усилия 9 усл. ед. и соответствующей вертикальной деформации 3,5 мм происходит необратимая потеря устойчивости стойки.

Дополнительная информация о характеристике продольной устойчивости была получена с помощью датчиков перемещений в направлениях осей X и Y (рис. 9). Из приведенных данных видна стабильность в характеристиках по обеим осям, что позволяет определить средние значения деформаций.

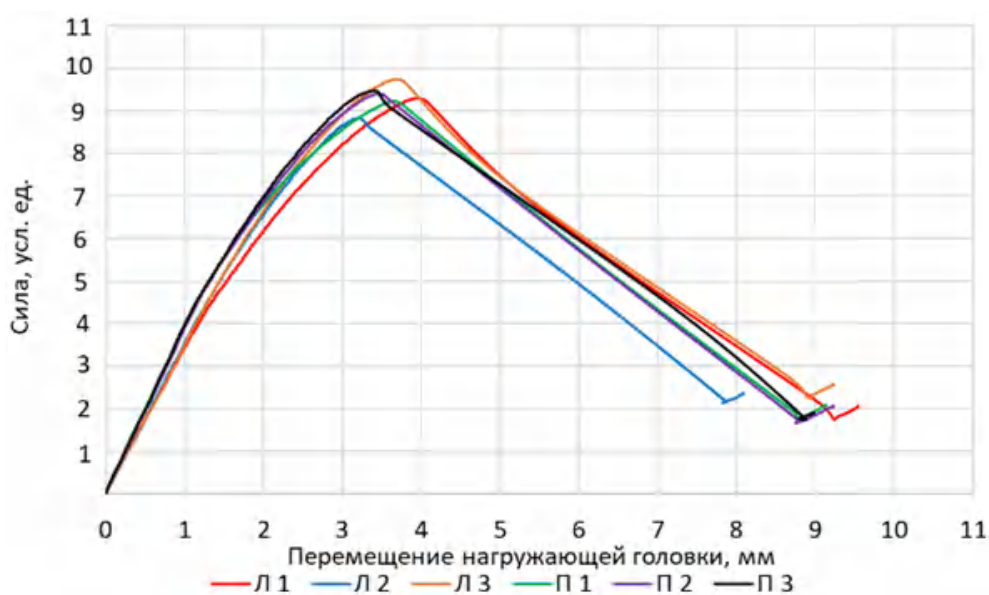


Рис. 8. Характеристики продольной устойчивости стоек передних стабилизаторов

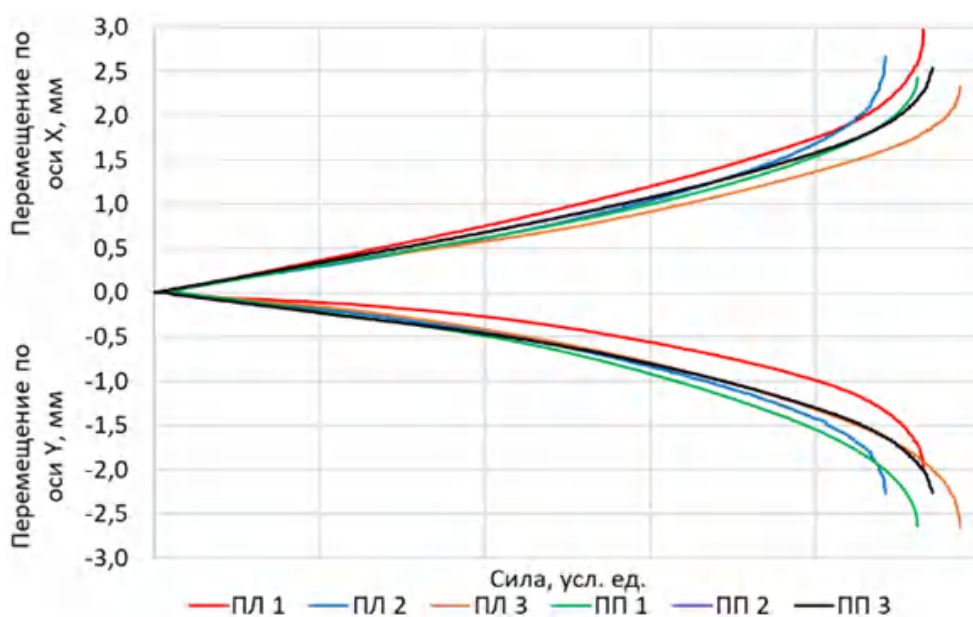


Рис. 9. Зависимости перемещений среднего сечения стойки по осям X и Y от усилия до достижения необратимой потери устойчивости стержня стойки

На рис. 10 представлена деформированная стойка переднего стабилизатора после потери устойчивости на стенде. Конструкция стойки переднего стабилизатора с взаимно перпендикулярной ориентацией пальцев шаровых шарниров обуславливает изгиб стержня стойки в двух плоскостях в близком соотношении углов. Используя показания датчиков по осям X и Y, был рассчитан угол, в направлении которого происходила деформация стержня стойки. Оценка среднего значения угла для группы образцов относительно оси X составил  $43^\circ$ .

На рис. 11 представлена деформированная стойка заднего стабилизатора после потери устойчивости на стенде. Анализ результатов оп-

ределения характеристик продольной устойчивости стоек заднего стабилизатора показал, что деформация стержня стойки происходит преимущественно в направлении оси Y. Данный характер деформации, вероятно, обусловлен однонаправленной ориентацией пальцев шаровых шарниров.

На рис. 12 представлена деформированная шарнирная тяга подвески после потери устойчивости на стенде. Испытания по определению продольной устойчивости шарнирных тяг показали, что перемещения центрального сечения стержня по оси X являются преимущественными, в то время как по оси Y они незначительны, их величина почти в 13 раз меньше, чем по оси X.



Рис. 10. Стойка переднего стабилизатора после потери устойчивости



Рис. 11. Стойка заднего стабилизатора после потери устойчивости



Рис. 12. Шарнирная тяга подвески после потери устойчивости

Анализ экспериментальных результатов демонстрирует схожий характер потери продольной устойчивости исследуемых объектов. Во всех рассмотренных случаях на начальном этапе нагружения по оси  $Z$  наблюдается зона линейной деформации, при этом поперечные перемещения среднего сечения стрержня имеют незначительную величину. По мере увеличения нагрузки достигается начало потери устойчивости, которое проявляется в виде отклонения линейной зависимости «сила – перемещение  $Z$ » и возникновения заметных поперечных перемещений  $X$ ,  $Y$ . На данной стадии происходит переход от преимущественно осевого деформирования к сжато-изгибаемому состоянию. При дальнейшем нагружении наблюдается стадия необратимой потери устойчивости, которая сопровождается интенсивным ростом поперечных перемещений среднего сечения стержня. На данной стадии объект исследования утрачивает способность воспринимать нагрузку без значительного увеличения деформации, что свидетельствует о необратимой потере продольной устойчивости и выходе конструкции из работоспособного состояния.

#### Выводы

В рамках исследований проведена комплексная работа по анализу устойчивости стоек стабилизатора, на основании которой сделаны следующие выводы:

– проанализированы конструктивные особенности стоек стабилизатора, условия их ра-

боты в составе подвески и типовые программы валидационных испытаний;

– выполнен аналитический расчет продольной устойчивости стоек стабилизатора, а также проведено численное моделирование с учетом геометрической и физической нелинейности. Полученные по формуле Тетмайера – Ясинского значения критической силы близки к полученным экспериментально значениям силы, при которой происходит необратимая потеря устойчивости;

– экспериментально определены допустимые нагрузки, воспринимаемые данными элементами, а также установлен характер и форма потери устойчивости при нагружении;

– подтверждено наличие значительного запаса по устойчивости для применяемого ТС в рамках исследования, что позволяет рассматривать их применение и при больших рабочих нагрузках;

– результаты расчета стоек стабилизаторов близки к экспериментальным. Для стойки переднего стабилизатора значение отличается от полученного экспериментально на 14 % в большую сторону, для стойки заднего стабилизатора – на 7 % в меньшую сторону. Стойка переднего стабилизатора начинает терять устойчивость при осевой деформации на 0,6 мм. Полученная численно сила начала потери устойчивости меньше экспериментального значения на 16 %. Это в том числе связано с методикой экспериментального определения точки начала потери устойчивости.

– определена продольная жесткость, которая оказывает влияние на распределение нагрузок и кинематику работы подвески и может быть использована при построении динамической модели подвески [49].

Проведенные исследования позволили разработать и экспериментально подтвердить методику оценки продольной устойчивости и жесткости стоек стабилизатора, выявить расхождения между расчетными и реальными характеристиками, уточнить требования к моделированию.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шелгинских, И. Н. Рациональное демпфирование в системе поддрессирования для обеспечения устойчивости автомобиля при высокоскоростном маневрировании / И. Н. Шелгинских // Труды НАМИ. – 2019. – № 1(276). – С. 55–63. – EDN XODCRH.
2. Смирнов, А. В. Совершенствование конструкций стоек стабилизатора поперечной устойчивости подвески легковых автомобилей / А. В. Смирнов, И. Г. Гун // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2014. – Т. 1. – С. 254–258. – EDN QZZWAL.
3. Гуцин, А. С. Моделирование поперечно-угловых колебаний транспортного средства / А. С. Гуцин, Е. А. Морозов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 2(62). – С. 159–163. – EDN SLDPAH.
4. Нгендакумана, М. К вопросу оценки надежности автомобилей, выполняющих пассажирские перевозки в Бурунди / М. Нгендакумана, А. Н. Ременцов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 1(64). – С. 91–99. – EDN UMXXSI.
5. Рябов, И. М. Расчет критической скорости на повороте автомобиля с незакрепленным грузом в кузове / И. М. Рябов, Д. М. Ханин, М. М. Мамакурбанов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10(113) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Наземные транспортные системы»; т. 6). – С. 30–33. – EDN QIKCPD.
6. Пархоменко, А. Н. Описательная модель исследований систем автоматизации многоосных автомобилей / А. Н. Пархоменко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2010. – № 3(22). – С. 11а–17. – EDN MWAQZT.
7. Динамический анализ параметров передней подвески кабины грузового автомобиля / А. С. Горобцов, С. К. Карцов, Ю. А. Поляков, А. С. Дьяков // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – Т. 1, № 4(22). – С. 73–79. – EDN THQJLR.
8. Насковец, А. М. Поперечная устойчивость карьерных самосвалов для глубоких карьеров / А. М. Насковец, А. Н. Костюкович, В. И. Моисеенко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2012. – Т. 1. – С. 186–190. – EDN YMDHFM.
9. Плавельский, А. Е. Повышение безопасности движения спецавтотранспортных средств с жидкотекучим строительным грузом / А. Е. Плавельский, Е. П. Плавельский // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 9. – С. 34–39. – EDN IZPVJX.
10. Вопросы совершенствования пожарно-спасательных автомобилей / П. И. Литвак, Р. Г. Данилов, В. И. Заколоткин, И. С. Грибанов // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 9. – С. 43–48. – EDN ZSNYRL.
11. Горшенков, И. С. Сравнительная оценка динамики разгона автомобиля formula electric MAD1, полученная при проведении математического моделирования и натурального эксперимента / И. С. Горшенков, С. С. Шадрин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2019. – № 4(22). – С. 8. – EDN YAMRBB.
12. Результаты проектирования стабилизаторов поперечной устойчивости болида «Формула Студент» ПНИПУ / Д. С. Аликин, Д. В. Головин, М. Ю. Петухов, А. М. Щелудяков // Грузовик. – 2021. – № 1. – С. 42–47. – EDN NIJOLV.
13. Бережнов, М. К. Определение рационального расположения шарнирных точек крепления системы поддрессирования к несущей системе гоночного автомобиля класса «формула студент» / М. К. Бережнов, В. А. Харрисон, К. Б. Евсеев // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2023. – № 4. – С. 1–10. – EDN NLSKZK.
14. Журкин, М. М. Результаты практической реализации модульной конструкции электропривода третьей оси гибридного мотовездехода / М. М. Журкин, А. Ю. Захаров, Т. В. Голубчик // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2024. – № 1(144). – С. 98–106. – EDN ONCJQM.
15. Тягунов, А. Е. Расчет и обоснование конструктивных параметров автомобильных механических стабилизаторов поперечной устойчивости с регулируемой жесткостью / А. Е. Тягунов, А. Б. Карташов // Известия МГТУ МАМИ. – 2017. – № 2(32). – С. 64–71. – EDN ZCCZMX.
16. 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. – EDN YGPQAT.
17. Зиновьев, Н. В. Вопросы устойчивости и управляемости транспортных машин при поворотах / Н. В. Зиновьев, Ю. С. Зиновьева // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 2. – С. 28–35. – DOI 10.15593/24111678/2022.02.04. – EDN AVQVUE.
18. Разработка имитационной математической модели электропривода механизма стабилизации кузова автобуса при крене в повороте / Е. Б. Сарач, В. А. Горелов, Б. Б. Косицын [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 9(153). – DOI 10.18698/2308-6033-2024-9-2384. – EDN MQINXX.
19. Тинт, Н. В. Результаты исследований жесткости стабилизаторов и угла крена кузова грузового автомобиля / Н. В. Тинт, В. М. Алакин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2023. – № 2. – С. 173–179. – EDN YUCADH.
20. Пневматический стабилизатор поперечной устойчивости для автобуса ПАЗ - 4234 / О. В. Судейко, М. А. Карпов, М. В. Сидоров, В. А. Горликов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 12(84). – С. 159–166. – EDN CZDKRW.
21. Базуров, А. А. Адаптивные подвески и интеллектуальные транспортные системы / А. А. Базуров, Г. В. Фисичев // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 1(102). – С. 9–11. – EDN YRGZYD.
22. Шелгинских, И. Н. Разработка комплексной методики проведения испытаний и оценки алгоритмов системы управления подвеской автомобиля / И. Н. Шелгинских, А. И. Бокарев // Труды НАМИ. – 2020. – № 4(283). – С. 62–71. – DOI 10.51187/0135-3152-2020-4-62-71. – EDN XKNTTC.

23. Юрлин, Д. В. Базовые алгоритмы управления жесткостью пневмоэлементов подвески автомобиля / Д. В. Юрлин, С. В. Бахмутов, В. А. Кулагин // Труды НАМИ. – 2020. – № 1(280). – С. 20–35. – DOI 10.51187/0135-3152-2020-1-20-35. – EDN BEPLXG.
24. Антонян, А. В. Метод защиты сочлененного электробуса от бокового опрокидывания / А. В. Антонян, А. В. Климов, А. О. Бучкин // Известия МГТУ МАМИ. – 2024. – Т. 18, № 3. – С. 232–243. – DOI 10.17816/2074-0530-627777. – EDN OHNVQ.
25. Корчагин, В. А. Повышение эффективности эксплуатации автотранспортных средств за счет новой конструкции независимой подвески / В. А. Корчагин, Е. В. Сливинский, Ю. Н. Ризаева // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 1. – С. 75–79. – EDN OUNNR.
26. Результаты экспериментальных исследований многозвенного супердлинного автопоезда при выполнении маневров «переставка» и «смена полосы движения» / А. Г. Выгонный, А. Н. Колесникович, С. В. Хитриков [и др.] // Труды НАМИ. – 2015. – № 263. – С. 45–64. – EDN VHRFIV.
27. Загарин, Д. А. Полигонные испытания - критерий оценки надежности отечественных транспортных средств / Д. А. Загарин, А. И. Зарайский // Журнал автомобильных инженеров. – 2011. – № 3(68). – С. 10–13. – EDN PFRTIF.
28. Таричко, В. И. Классификация отказов и неисправностей легковых автомобилей с целью создания системы оценки технического состояния / В. И. Таричко, С. А. Ратников // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2024. – № 3. – С. 225–236. – EDN LDRONE.
29. Демин, П. Е. Исследование проблемы взаимозаменяемости деталей машин от разных производителей на примере стойки стабилизатора / П. Е. Демин, А. А. Брежнев, М. В. Моршилов // Научные горизонты. – 2018. – № 11-часть 1(15). – С. 71–79. – EDN YOUNDV.
30. Столяров, Ф. А. Практическое применение методов опережающей стандартизации для снижения уровня дефектности в эксплуатации на примере шаровых шарниров / Ф. А. Столяров, И. Г. Гун, М. А. Полякова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2025. – Т. 23, № 4. – С. 139–146. – DOI 10.18503/1995-2732-2025-23-4-139-146. – EDN OIKSIA.
31. Устьянцев, Ю. А. Коррозионная стойкость конструктивных компонентов автомобиля при воздействии противогололедных реагентов / Ю. А. Устьянцев, Н. Л. Великанов // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2025. – № 3(73). – С. 3–7. – EDN STRIAG.
32. Витюткина, Т. А. Деятельность немецких автомобильных компаний на рынке России в условиях санкций / Т. А. Витюткина, Л. С. Витюткина // Калужский экономический вестник. – 2023. – № 4. – С. 27–31. – EDN FNJPNL.
33. Гируцкий, О. И. Сертификация автомобильных компонентов - главное условие обеспечения безопасности на автотранспорте / О. И. Гируцкий, И. И. Малашков, А. Д. Рудаков // Труды НАМИ. – 2010. – № 245. – С. 79–114. – EDN NOSOCX.
34. Расчетно-экспериментальная оценка статической поперечной устойчивости грузовых автомобилей с различными стабилизаторами / С. В. Харитончик, А. Г. Выгонный, А. Н. Колесникович, О. В. Матушкина // Актуальные вопросы машиноведения. – 2013. – Т. 2. – С. 158–160. – EDN ZXVIFR.
35. Мавлонов, М. Х. Метод определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы / М. Х. Мавлонов, М. В. Четвериков // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2025. – № 1(148). – С. 104–110. – DOI 10.46960/1816-210X\_2025\_1\_104. – EDN CWINBO.
36. Повышение безопасности мобильных машин на основе совершенствования характеристик рулевого управления и подвески / Б. Н. Белоусов, Л. Б. Банникова, А. М. Швецов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 1(14). – С. 21–27. – EDN QZVWZZ.
37. Ляхов, С. В. Математическая модель и программное обеспечение для оценки систем контроля устойчивости грузовых автомобилей и автобусов / С. В. Ляхов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 4(17). – С. 24–28. – EDN QZPUBR.
38. Макаров, В. С. Исследование статической поперечной устойчивости грузового автомобиля / В. С. Макаров, Д. А. Бутин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 194. – С. 220–235. – DOI 10.21515/1990-4665-194-021. – EDN JLNVDK.
39. Столбов, А. Г. Экспериментальное исследование характеристик резиновых опор стабилизатора поперечной устойчивости транспортного средства / А. Г. Столбов, Д. Е. Мещеряков, А. Л. Эйдельман // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, Ижевск, 25–26 апреля 2025 г. / под ред. Н. М. Филькина. – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025. – С. 450–454.
40. Беляев, В. П. Стендовые испытания автомобилей и тракторов: учебное пособие / В. П. Беляев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 55 с. – ISBN 978-5-696-03847-6. – EDN QNVTVT.
41. Симонов, А. В. Модернизация задней независимой подвески переднеприводных автомобилей / А. В. Симонов, Б. П. Садковский, О. А. Царев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 10-5. – С. 209–213. – EDN UNGOJR.
42. Карасев, А. В. Новые разработки от производителей колесных машин / А. В. Карасев // Технология колесных и гусеничных машин. – 2013. – № 4(8). – С. 6–15. – EDN QZLRVJ.
43. Новации в компоновке и повышении поперечной устойчивости карьерных самосвалов сверх особо большой грузоподъемности / О. Г. Степук, А. М. Насковец, В. И. Моисеенко, А. Г. Сидоренко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2020. – № 4(53). – С. 28–34. – DOI 10.46864/1995-0470-2020-4-53-28-34. – EDN JJKXFU.
44. Горобцов, А. С. Построение статических характеристик зависимых подвесок автомобиля повышенной проходимости с помощью пространственной модели / А. С. Горобцов, С. К. Карцов, Ю. А. Поляков // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 1. – С. 10–13. – EDN QBMVAT.
45. Вдовин, Д. С. Автоматизация нагружения конечно-элементных моделей несущих систем колесных машин с применением метода инерционной разгрузки и твердотельной динамической модели автомобиля / Д. С. Вдовин, И. В. Чичекин, Я. Ю. Левенков // Труды НАМИ. – 2018. – № 1(272). – С. 36–50. – EDN XMNHML.
46. Сопротивление материалов: лабораторный практикум / И. В. Демьянушко, А. С. Груздев, В. С. Надеждин, А. Д. Сурунович. – М.: МАДИ, 2024. – 162 с. – EDN DVAEFO.
47. Roache, P. J. Verification and Validation in Computational Science and Engineering. – Albuquerque: Hermosa Publishers, 1998. – 466 p.

48. *Lake, M. S., Fung J., Gloss K., Liechty D.S.* Experimental characterization of hysteresis in a revolute joint for precision deployable structures // 38th Structures, Structural Dynamic and Material Conference, Kissimmee, Florida, 7–10 April 1997. – Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997. – Paper AIAA 97-1379. – 12 p.

49. *Milliken, W. F., Milliken D. L.* Race car vehicles dynamics. – Warrendale, PA: SAE International, 1995. – 890 p.

### REFERENCES

1. *Shelginskikh, I. N.* Rational damping in the suspension system to ensure vehicle stability during high-speed maneuvering / I. N. Shelginskikh // Proceedings of NAMI. - 2019. - No. 1 (276). - Pp. 55-63. - EDN XODCRH.

2. *Smirnov, A. V.* Improving the designs of anti-roll bar struts of passenger car suspensions / A. V. Smirnov, I. G. Gun // Actual problems of modern science, technology and education. - 2014. - Vol. 1. - Pp. 254-258. - EDN QZZWAL.

3. *Gushchin, A. S.* Modeling of transverse-angular oscillations of a vehicle / A. S. Gushchin, E. A. Morozov // Bulletin of the Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. – 2014. – No. 2(62). – P. 159-163. – EDN SLDPAH.

4. *Ngendakumana, M.* On the issue of assessing the reliability of vehicles performing passenger transportation in Burundi / M. Ngendakumana, A. N. Rementsov // Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). – 2021. – No. 1(64). – P. 91-99. – EDN UMXXSI.

5. *Ryabov, I. M.* Calculation of the critical speed on a turn of a vehicle with unsecured cargo in the back / I. M. Ryabov, D. M. Khanin, M. M. Mamakurbanov // Bulletin of the Volgograd State Technical University. Series: Ground Transport Systems. – 2013. – Vol. 6, No. 10(113). – P. 30-33. – EDN QIKCPD.

6. *Parkhomenko, A. N.* Descriptive model for studying automation systems of multi-axle vehicles / A. N. Parkhomenko // Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). – 2010. – No. 3(22). – P. 11a-17. – EDN MWAQZT.

7. Dynamic analysis of the parameters of the front suspension of a truck cab / A. S. Gorobtsov, S. K. Kartsov, Yu. A. Polyakov, A. S. Dyakov // Bulletin of Moscow State Technical University MAMI. – 2014. – Vol. 1, No. 4(22). – P. 73-79. – EDN THQJLR.

8. *Naskovets, A. M.* Lateral stability of quarry dump trucks for deep quarries / A. M. Naskovets, A. N. Kostyukovich, V. I. Moiseenko // Current issues in mechanical engineering. - 2012. - Vol. 1. - Pp. 186-190. - EDN YMDHFM.

9. *Plavelsky, A. E.* Improving the safety of special vehicles with fluid construction cargo / A. E. Plavelsky, E. P. Plavelsky // Construction and road machinery. - 2020. - No. 9. - Pp. 34-39. - EDN IZPVJX.

10. Improvement of fire and rescue vehicles / P. I. Litvak, R. G. Danilov, V. I. Zakolodkin, I. S. Gribanov // Construction and road machinery. – 2022. – No. 9. – P. 43-48. – EDN ZSNYRL.

11. *Gorshenkov, I. S.* Comparative assessment of the acceleration dynamics of the Formula Electric MADI car, obtained through mathematical modeling and a full-scale experiment / I. S. Gorshenkov, S. S. Shadrin // Automobile. Road. Infrastructure. – 2019. – No. 4(22). – P. 8. – EDN YAMRBB.

12. Results of the design of anti-roll bars for the Formula Student racing car of PNIPU / D. S. Alikin, D. V. Golovin, M. Yu. Petukhov, A. M. Shcheludyakov // Truck. – 2021. – No. 1. – P. 42-47. – EDN NIJOLV.

13. *Berezhnov, M. K.* Determination of the rational arrangement of the hinge points of the suspension system attachment to the load-bearing system of a Formula Student racing car / M. K. Berezhnov, V. A. Harrison, K. B. Evseev // Machines and installations: design, development and operation. - 2023. - No. 4. - Pp. 1-10. - EDN NLSKZK.

14. *Zhurkin, M. M.* Results of the practical implementation of the modular design of the electric drive of the third axle of a hybrid all-terrain vehicle / M. M. Zhurkin, A. Yu. Zakharov, T. V. Golubchik // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. - 2024. - No. 1 (144). - Pp. 98-106. - EDN ONCJQM.

15. *Tyagunov, A. E.* Calculation and justification of the design parameters of automotive mechanical anti-roll bars with adjustable stiffness / A. E. Tyagunov, A. B. Kartashov // Bulletin of MSTU MAMI. - 2017. - No. 2 (32). - Pp. 64-71. - EDN ZCCZMX.

16. *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. Kuvshinov, E. S. Smolko // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). - 2020. - No. 4 (63). - Pp. 43-54. - EDN YGPQAT.

17. *Zinoviev, N. V.* Issues of stability and controllability of transport vehicles when turning / N. V. Zinoviev, Yu. S. Zinovieva // Transport. Transport structures. Ecology. - 2022. - No. 2. - P. 28-35. - DOI 10.15593/24111678/2022.02.04. - EDN AVQVUE.

18. Development of a simulation mathematical model of the electric drive of the bus body stabilization mechanism during roll in a turn / E. B. Sarach, V. A. Gorelov, B. B. Kositsyn [et al.] // Engineering journal: science and innovation. - 2024. - No. 9 (153). - DOI 10.18698/2308-6033-2024-9-2384. - EDN MQINXX.

19. *Tint, N. V.* Results of the study of the rigidity of stabilizers and the roll angle of the truck body / N. V. Tint, V. M. Alakin // Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University. - 2023. - No. 2. - Pp. 173-179. - EDN YUCADH.

20. Pneumatic anti-roll bar for the PAZ-4234 bus / O. V. Sudeiko, M. A. Karpov, M. V. Sidorov, V. A. Gorlikov // Engineering Bulletin of the Don. - 2021. - No. 12 (84). - Pp. 159-166. - EDN CZDKRW.

21. *Bazurov, A. A.* Adaptive suspensions and intelligent transport systems / A. A. Bazurov, G. V. Fischev // Journal of automotive engineers. - 2017. - No. 1 (102). - Pp. 9-11. - EDN YRGZYD.

22. *Shelginskikh, I. N.* Development of an integrated methodology for testing and evaluating algorithms for a vehicle suspension control system / I. N. Shelginskikh, A. I. Bokarev // Proceedings of NAMI. - 2020. - No. 4 (283). - Pp. 62-71. - DOI 10.51187/0135-3152-2020-4-62-71. - EDN XKNTTC.

23. *Yurlin, D. V.* Basic algorithms for controlling the stiffness of vehicle suspension pneumatic elements / D. V. Yurlin, S. V. Bakhmutov, V. A. Kulagin // Proceedings of NAMI. - 2020. - No. 1 (280). - Pp. 20-35. - DOI 10.51187/0135-3152-2020-1-20-35. - EDN BEPLXG.

24. *Antonyan, A. V.* Method for protecting an articulated electric bus from lateral rollover / A. V. Antonyan, A. V. Klimov, A. O. Buchkin // Bulletin of Moscow State Technical University "MAMI". - 2024. - Vol. 18, No. 3. - Pp. 232-243. - DOI 10.17816/2074-0530-627777. - EDN OHHIVQ.

25. *Korchagin, V. A.* Increasing the efficiency of vehicle operation due to a new design of independent suspension / V. A. Korchagin, E. V. Slivinsky, Yu. N. Rizaeva // Science and Technology of Transport. - 2012. - No. 1. - Pp. 75-79. - EDN OUNNHR.

26. Results of experimental studies of a multi-link super-long road train when performing "rearrangement" and "lane change" maneuvers / A. G. Vygonny, A. N. Kolesnikovich, S. V. Khitrikov [et al.] // Proceedings of NAMI. - 2015. - No. 263. - Pp. 45-64. - EDN VHRFIV.
27. Zagarin, D. A. Field tests - a criterion for assessing the reliability of domestic vehicles / D. A. Zagarin, A. I. Zaryasky // Journal of Automotive Engineers. - 2011. - No. 3 (68). - P. 10-13. - EDN PFRTIF.
28. Tarichko, V. I. Classification of failures and malfunctions of passenger cars in order to create a system for assessing the technical condition / V. I. Tarichko, S. A. Ratnikov // Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University. - 2024. - No. 3. - P. 225-236. - EDN LDRONE.
29. Demin, P. E. Study of the problem of interchangeability of machine parts from different manufacturers on the example of a stabilizer strut / P. E. Demin, A. A. Brezhnev, M. V. Morshchilov // Scientific horizons. - 2018. - No. 11-part 1(15). - P. 71-79. - EDN YOUNDV.
30. Stolyarov, F. A. Practical application of methods of advanced standardization to reduce the level of defects in operation using the example of ball joints / F. A. Stolyarov, I. G. Gun, M. A. Polyakova // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov. - 2025. - Vol. 23, No. 4. - P. 139-146. - DOI 10.18503/1995-2732-2025-23-4-139-146. - EDN OIKSIA.
31. Ustyantsev, Yu. A. Corrosion resistance of vehicle structural components when exposed to anti-icing reagents / Yu. A. Ustyantsev, N. L. Velikanov // Technical and technological problems of service. - 2025. - No. 3 (73). - Pp. 3-7. - EDN STRIAG.
32. Vityutina, T. A. Activities of German automobile companies in the Russian market under sanctions / T. A. Vityutina, L. S. Vityutina // Kaluga Economic Bulletin. - 2023. - No. 4. - Pp. 27-31. - EDN FNJPNL.
33. Girutsky, O. I. Certification of automotive components - the main condition for ensuring safety in motor transport / O. I. Girutsky, I. I. Malashkov, A. D. Rudakov // Proceedings of NAMI. - 2010. - No. 245. - Pp. 79-114. - EDN NOSOCX.
34. Calculation and experimental assessment of the static lateral stability of trucks with different stabilizers / S. V. Kharitonchik, A. G. Vygonny, A. N. Kolesnikovich, O. V. Matushkina // Current issues in mechanical engineering. - 2013. - Vol. 2. - Pp. 158-160. - EDN ZXVIFR.
35. Mavlonov, M. Kh. Method for Determining the Rigidity of an Arbitrary-Shape Anti-Roll Bar / M. Kh. Mavlonov, M. V. Chetverikov // Proceedings of R.E. Alekseev Novosibirsk State Technical University. - 2025. - No. 1 (148). - P. 104-110. - DOI 10.46960/1816-210X\_2025\_1\_104. - EDN CWINBO.
36. Improving the Safety of Mobile Machines by Improving the Characteristics of Steering and Suspension / B. N. Belousov, L. B. Bannikova, A. M. Shvetsov [et al.] // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. - 2011. - No. 1 (14). - P. 21-27. - EDN QZVWZZ.
37. Lyakhov, S. V. Mathematical model and software for evaluating stability control systems of trucks and buses / S. V. Lyakhov // Mechanics of machines, mechanisms and materials. - 2011. - No. 4 (17). - Pp. 24-28. - EDN QZPUBR.
38. Makarov, V. S. Study of static lateral stability of a truck / V. S. Makarov, D. A. Butin // Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. - 2023. - No. 194. - Pp. 220-235. - DOI 10.21515/1990-4665-194-021. - EDN JLNYDK.
39. Stolbov, A.G. Experimental study of the characteristics of rubber mounts of the anti-roll bar of a vehicle / Stolbov A.G., Meshcheryakov D.E., Eidelman A.L. // Automotive industry: design, engineering, calculation and repair and production technologies: Proceedings of the IX All-Russian scientific and practical conference, Izhevsk, April 25-26, 2025 / edited by N.M. Filkin. - Izhevsk: Publishing house of UIR Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, 2025. - P. 450-454.
40. Belyaev, V. P. Bench tests of cars and tractors: a tutorial / V. P. Belyaev. - Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2008. - 55 p. - ISBN 978-5-696-03847-6. - EDN QNVBTB.
41. Simonov, A. V. Modernization of the rear independent suspension of front-wheel drive vehicles / A. V. Simonov, B. P. Sadkovsky, O. A. Tsarev // Actual problems of humanitarian and natural sciences. - 2015. - No. 10-5. - Pp. 209-213. - EDN UNGOJR.
42. Karasev, A. V. New developments from wheeled vehicle manufacturers / A. V. Karasev // Technology of wheeled and tracked vehicles. - 2013. - No. 4 (8). - Pp. 6-15. - EDN QZLRVJ.
43. Innovations in the layout and improvement of lateral stability of super-heavy-duty quarry dump trucks / O. G. Stepuk, A. M. Naskovets, V. I. Moiseenko, A. G. Sidorenko // Mechanics of machines, mechanisms and materials. - 2020. - No. 4 (53). - Pp. 28-34. - DOI 10.46864/1995-0470-2020-4-53-28-34. - EDN JJKXFU.
44. Gorobtsov, A. S. Construction of static characteristics of dependent suspensions of an all-terrain vehicle using a spatial model / A. S. Gorobtsov, S. K. Kartsov, Yu. A. Polyakov // Science and technology of transport. - 2013. - No. 1. - Pp. 10-13. - EDN QBMVAT.
45. Vdovin, D. S. Automation of loading of finite element models of load-bearing systems of wheeled vehicles using the inertial unloading method and a solid-state dynamic model of the vehicle / D. S. Vdovin, I. V. Chichekin, Ya. Yu. Levenkov // Proceedings of NAMI. - 2018. - No. 1 (272). - P. 36-50. - EDN XMHHML.
46. Strength of materials: laboratory practical training / I. V. Demyanushko, A. S. Gruzdev, V. S. Nadezhdin, A. D. Surunovich. - M.: MADI, 2024. - 162 p. - EDN DVAEFO.
47. Roache P. J. Verification and Validation in Computational Science and Engineering. - Albuquerque: Hermosa Publishers, 1998. - 466 p.
48. Lake M. S., Fung J., Gloss K., Liechty D.S. Experimental characterization of hysteresis in a revolute joint for precision deployable structures // 38th Structures, Structural Dynamic and Material Conference, Kissimmee, Florida, 7-10 April 1997. - Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997. - Paper AIAA 97-1379. - 12 p.
49. Milliken W. F., Milliken D. L. Race car vehicles dynamics. - Warrendale, PA: SAE International, 1995. - 890 p.

Статья поступила в редакцию 20.04.2026, доработана 13.05.2026, подписана в печать 15.05.2026

The article was submitted 20.04.2026, revised 13.05.2026, accepted for publication 15.05.2026

УДК 629.3.018; 629.3.027.3  
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-80-84

Научная статья  
Original article

*К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, В. В. Новиков, А. М. Ковалев*

## ДОРОЖНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПОДВЕСКИ С ИНЕРЦИОННО-ФРИКЦИОННЫМИ И ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ АМОРТИЗАТОРАМИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Алексей Владимирович Поздеев, pozdeev.vstu@gmail.com

**Аннотация.** Представлены результаты дорожных испытаний подвески с гидравлическим амортизатором (ГА) и инерционно-фрикционным амортизатором (ИФА), являющим собой маховичный поглотитель колебаний с планетарным редуктором-мультипликатором, на входном валу которого установлена фрикционная муфта и поворотный рычаг, а на выходном валу – маховик в виде диска. ИФА устанавливается на раме кузова автомобиля, с помощью тяги его поворотный рычаг соединяется с мостом автомобиля. Дорожные испытания проведены на автомобиле «ГАЗель». По их результатам построены графики вертикальных среднеквадратических ускорений на сиденье пассажира при движении по грунтовой и асфальтированной дорогам без и с дополнительным инерционным гасителем с учетом норм вибронегативности.

**Ключевые слова:** автомобильная подвеска, виброзащитные свойства, гидравлический амортизатор, инерционно-фрикционный амортизатор, дорожные испытания

**Для цитирования:** Чернышов К. В., Поздеев А. В., Новиков В. В., Ковалев А. М. Дорожные испытания автомобильной подвески с инерционно-фрикционными и гидравлическими амортизаторами. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 2(55): 80–84. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-80-84.

### Информация об авторах:

**Константин Владимирович Чернышов** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-2816-1768>

e-mail: chernykv@rambler.ru

**Алексей Владимирович Поздеев** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-3144-3619>

e-mail: avp24897@mail.ru

**Вячеслав Владимирович Новиков** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0002-0917-781X>

e-mail: nvv\_60@mail.ru

**Александр Михайлович Ковалев** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автомобильные перевозки» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0001-5835-7967>

e-mail: ak-553@yandex.ru

### Вклад авторов:

**К. В. Чернышов** – обработка результатов эксперимента.

**А. В. Поздеев** – установка и настройка измерительной аппаратуры.

**В. В. Новиков** – подготовка и проведение испытаний, формулировка выводов.

**А. М. Ковалев** – формулировка выводов, структурирование текста и оформление статьи.

*K. V. Chernyshov, A. V. Pozdeev, V. V. Novikov, A. M. Kovalev*

## TESTING OF A VEHICLE SUSPENSION WITH INERTIAL-FRICTION AND HYDRAULIC SHOCK ABSORBERS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Alexey V. Pozdeev, pozdeev.vstu@gmail.com

**Abstract.** The results of road tests of a suspension with a hydraulic shock absorber (GA) and an inertial-friction shock absorber (IFA) are presented. The IFA is a flywheel-type vibration absorber with a planetary gearbox-multiplier, on the input shaft of which a friction clutch and a rotary lever are installed, and on the output shaft – a flywheel in the form of a disc. The IFA is installed on the car body frame, with the help of a thrust its rotary lever is connected to the car bridge. Road tests were carried out on a GAZelle car. Based on their results, graphs of vertical root-mean-square accelerations on the passenger seat were constructed when driving on unpaved and paved roads without and with an additional inertial damper, taking into account the vibration load standards.

**Keywords:** car suspension, vibration protection properties, hydraulic shock absorber, inertial-friction shock absorber, road tests

**For citation:** Chernyshov K. V., Pozdeev A. V., Novikov V. V., Kovalev A. M. Testing of a vehicle suspension with inertial-friction and hydraulic shock absorbers. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*. 2026; 2(55): 80–84. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-2-55-80-84.

**Information about the authors:**

**Konstantin V. Chernyshov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Operation and Repair of Automobiles VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-2816-1768>

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

**Alexey V. Pozdeev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Installations VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-3144-3619>

e-mail: [avp24897@mail.ru](mailto:avp24897@mail.ru)

**Vyacheslav V. Novikov** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automatic Installations VSTU

<https://orcid.org/0000-0002-0917-781X>

e-mail: [nvv\\_60@mail.ru](mailto:nvv_60@mail.ru)

**Alexander M. Kovalev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Road transportation VSTU

<https://orcid.org/0000-0001-5835-7967>

e-mail: [ak-553@yandex.ru](mailto:ak-553@yandex.ru)

**Contribution of the authors:**

**Konstantin V. Chernyshov** – processing of experimental results.

**Alexey V. Pozdeev** – installation and configuration of measuring equipment.

**Vyacheslav V. Novikov** – preparation and execution of tests, and formulation of conclusions.

**Alexander M. Kovalev** – formulation of conclusions, text structuring, and article formatting.

**Введение**

Инерционно-фрикционный амортизатор (ИФА) представляет собой маховичный поглотитель колебаний с редуктором-мультипликатором, на входном валу которого установлена фрикционная муфта и поворотный рычаг, а на выходном валу – маховик в виде диска. ИФА устанавливается на раме кузова автомобиля, с помощью тяги его поворотный рычаг соединяется с мостом автомобиля. Применение инерционных амортизаторов является одним из перспективных направлений повышения виброзащитных свойств систем поддрессирования автотранспортных средств (АТС). Результаты исследования свойств ИФА описаны в работах [1–9] и др. Разработке различных конструкций ИФА посвящены патенты РФ на изобретения № 2142585 [10], 2142586 [11], 2313014 [12], 2486385 [13], 2726324 и на полезные модели № 195304, 195309, 188666, 189476, 189482 и др.

По изначальному замыслу маховик ИФА увеличивает приведенную поддрессоренную массу и посредством фрикциона создает дополнительное сопротивление, противодействуя штатному гидроамортизатору (ГА) подвески в зонах его неэффективной работы. Исследования показали, что в отдельных диапазонах частот ИФА эффективно гасит колебания поддрессоренной массы и в отсутствие штатного ГА. Это обусловлено тем, что ИФА представляет собой, по существу, динамический поглотитель колеба-

ний. Однако максимального эффекта ИФА достигает только при наличии штатного ГА.

Для подтверждения этого эффекта были проведены стендовые и дорожные испытания ИФА с планетарным редуктором, изготовленным по патенту № 2486385 [13]. Результаты стендовых испытаний изложены в статье [14], а особенности и результаты дорожных испытаний представлены ниже.

**Особенности и результаты дорожных испытаний**

Поглотитель колебаний был установлен параллельно упругому и демпфирующему (ГА) элементам каждого колеса автомобиля «ГАЗель». На рис. 1 показана установка экспериментального ИФА на переднюю и заднюю ось автомобиля «ГАЗель». На передней оси ИФА устанавливались параллельно листовым рессорам в продольном направлении на специальных кронштейнах, на задней оси – перпендикулярно листовым рессорам на поперечине трубчатого сечения за задним мостом.

Экспериментальный ИФА имел следующие параметры: масса ИФА – 30 кг; момент инерции маховика  $0,0037 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  при массе маховика – 1,5 кг; общее передаточное число двухрядного планетарного редуктора-мультипликатора – 48, длина поворотного рычага – 160 мм; сила на рычаге в момент буксования фрикционной муфты ИФА  $F_{\text{тр}} = 750 \text{ Н}$ .



Рис. 1. Установка экспериментального ИФА на автомобиль «ГАЗель» на передней подвеске (виды спереди и сбоку) и на задней подвеске

В процессе испытаний регистрировались скорость автомобиля по его спидометру, а также ускорения с помощью вибрационного анализатора фирмы «Svantek». Датчик ускорений устанавливался на пассажирском сиденье по центру кузова. В качестве трассы были выбраны участок асфальтированной дороги и участок разбитой грунтовой дороги. Испытания проводились на автомобиле со штатными ГА, с ИФА без задних ГА и с ИФА совместно со всеми штатными ГА.

Результаты испытаний представлены для отдельных участков дорог в виде среднеквадратических ускорений в третьоктавных полосах, полученных с помощью программы «SvanPC» для вибрационного анализатора «Svantek» (рис. 2). На рис. 2 также представлены в виде графиков I, II и III нормы ИСО: граница снижения производительности труда от транспортной усталости (распространяется как на пассажиров, так и на водителей) для  $T = 8$  ч,  $T = 4$  ч и  $T = 1$  ч.

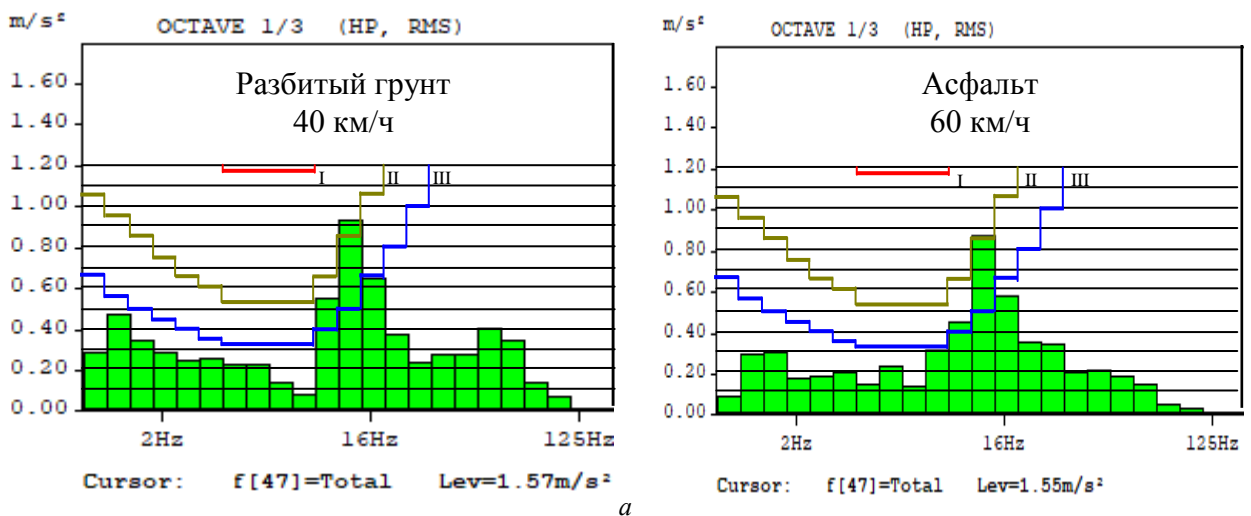
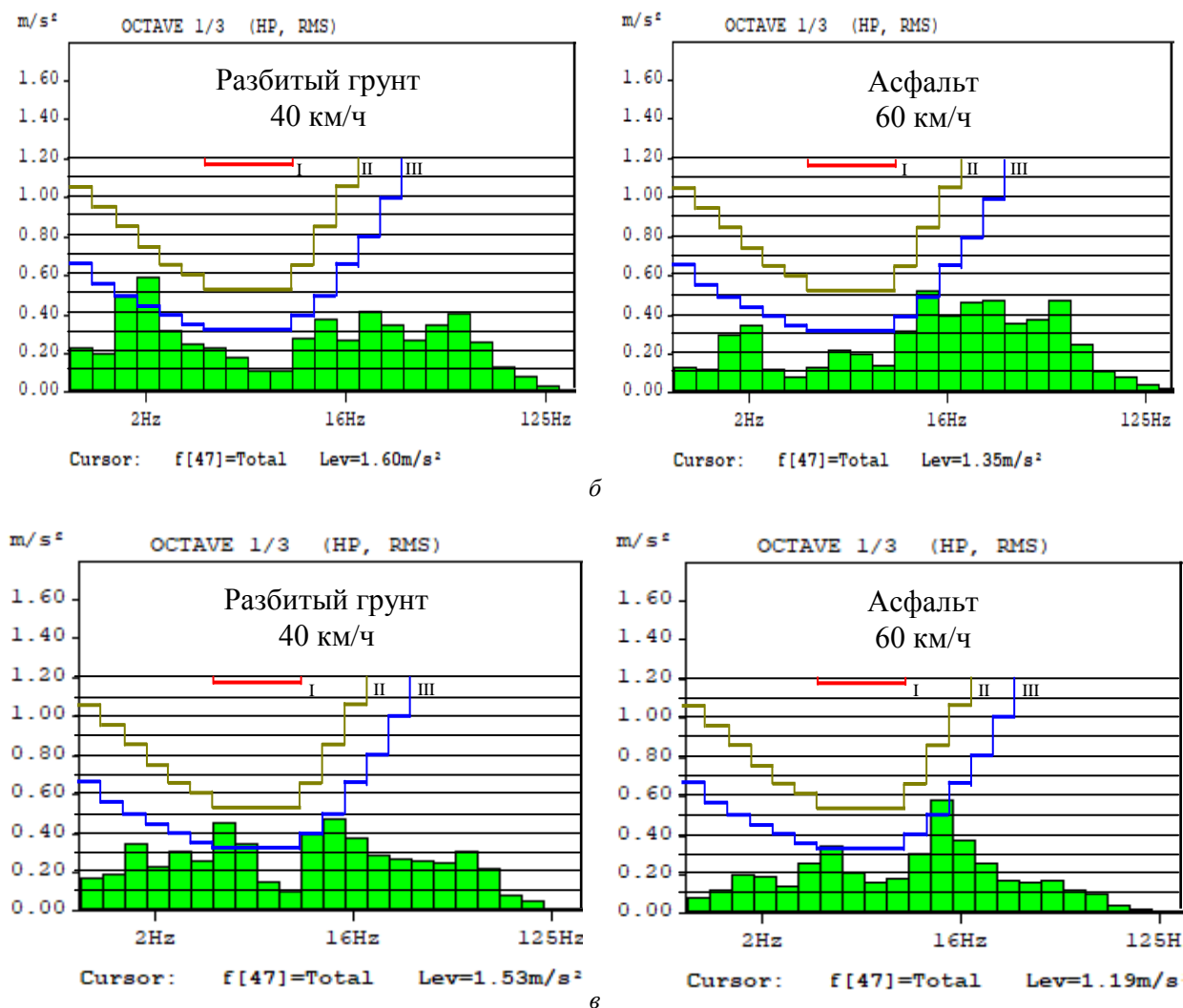


Рис. 2. Среднеквадратические вертикальные ускорения поддресоренной массы в третьоктавных полосах при движении по разбитому грунту со скоростью 40 км/ч по асфальту со скоростью 60 км/ч:  
*a* – серийная подвеска; *б* – подвеска с ИФА без задних ГА; *в* – подвеска с ИФА и ГА; границы среднеквадратических вертикальных ускорений поддресоренной массы в третьоктавных полосах для снижения производительности труда от транспортной усталости по нормам ИСО для I –  $T = 8$  ч; II –  $T = 4$  ч; III –  $T = 1$  ч (см. также с. 83)



б

б

Рис. 2. Окончание

**Выводы:**

– дорожные испытания автомобиля «ГАЗель» подтвердили эффективность совместного применения инерционно-фрикционного и гидравлического амортизаторов, обеспечивающих эффективное снижение ускорений в низкочастотной и высокочастотной зонах кинематического воздействия;

– по сравнению с ГА дополнительная установка в подвеску автомобиля ИФА эффективно уменьшает ускорения в низкочастотной зоне (1,5–8 Гц) и в высокочастотной зоне (12–18 Гц), что практически обеспечивает удовлетворение норм ИСО для  $T = 8$  часов при движении по асфальту со скоростью 60 км/ч и при движении по грунтовой дороге со скоростью 40 км/ч.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Амортизаторы с рекуперацией энергии в цикле колебаний / В. В. Новиков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов,

В. В. Воробьев, А. В. Галов // Справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение, 2001. – № 7. – С. 31–34.

2. Новиков, В. В. Расчет инерционно-фрикционных амортизаторов подвесок // Грузовик&. – М.: Машиностроение, 2005. – № 3. – С. 22–23.

3. Инерционные амортизаторы со сдвигающим элементом для подвесок АТС / И. М.Рябов, В. В. Новиков, В. В.Воробьев, С. В.Данилов, О. В.Смолянов // Грузовик &. – М.: Машиностроение, 2005. – № 4. – С. 9–10.

4. Математические модели подвески транспортного средства с инерционно-фрикционным амортизатором / И. М. Рябов, К. В. Чернышев, В. В. Воробьев, И. Н. Уруков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / ИрГУПС. – Иркутск, 2009. – Вып.1 (21). – С. 22–31.

5. Новиков, В. В. Виброзащитные свойства подвески при совместной работе гидравлических и инерционно-фрикционных амортизаторов / В. В. Новиков, О. В. Смолянов // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2009. – № 1. – С. 81–83.

6. Новиков, В. В. Vibrational protection provided by automobile suspensions with both hydraulic and inertial-frictional shock absorbers / В. В. Новиков, О. В. Смолянов // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29, № 1. – С. 68–70.

7. Типы конструкций инерционно-фрикционных амортизаторов, их моделирование и испытания / И. М. Рябов, В. В. Новиков, А. В. Поздеев, К. В. Чернышов, А. С. Митрошенко // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 4. – С. 23–26.
8. Экспериментальные исследования амортизирующих устройств транспортных средств / И. М. Рябов, В. В. Воробьев, Р. Ю. Упырь, А. С. Логунов, Д. Н. Насников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 2 (22). – С. 81–84.
9. Экспериментальные исследования инерционно-фрикционных демпферов в системах подвешивания транспортных средств (Ч. 1) / И. М. Рябов, К. В. Чернышов, С. В. Елисеев, Р. Ю. Упырь // Вестник Иркутского гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 42, № 2. – С. 146–154.
10. Пат. 2142585 Российская Федерация. Амортизатор / И. М. Рябов, В. В. Новиков; заявитель ВолгГТУ. – 1999. – Бюл. 34.
11. Пат. 2142586 Российская Федерация. Амортизатор / И. М. Рябов, В. В. Новиков; заявитель ВолгГТУ. – 1999. – Бюл. 34.
12. Пат. 2313014 Российская Федерация. Амортизатор / И. М. Рябов, К. В. Чернышов, В. В. Воробьев, А. Ю. Соколов; заявитель ВолгГТУ. – 2007. – Бюл. 35.
13. Пат. 2486385 РФ, МПК F16F7/10. Амортизатор / В. Д. Варфоломеев, В. В. Власов, И. М. Рябов; патентообладатель В. Д. Варфоломеев. – 2013, Бюл. № 21 (III ч.).
14. Стендовые испытания автомобильной подвески с инерционно-фрикционными и гидравлическими амортизаторами / А. В. Поздеев, К. В. Чернышов, В. В. Новиков, А. М. Ковалев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 4 (53). – С. 90–94.
4. Mathematical models of vehicle suspension with an inertial-friction shock absorber / I. M. Ryabov, K. V. Chernyshev, V. V. Vorobyov, I. N. Urukov // Modern technologies. System Analysis. Modeling / Irkutsk State Transport University. – Irkutsk, 2009. – Issue 1 (21). – Pp. 22–31.
5. Novikov, V. V. Vibration-protective properties of suspension during joint operation of hydraulic and inertial-friction shock absorbers / V. V. Novikov, O. V. Smolyanov // Bulletin of Mechanical Engineering, Moscow: Mashinostroenie, 2009, No. 1, pp. 81–83.
6. Novikov, V. V. Vibrational protection provided by automobile suspensions with both hysteric and inertial-frictional shock absorbers / V.V.Novikov, O.V.Smolyanov// Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29, No. 1. – pp. 68–70.
7. Types of inertial-friction shock absorbers, their modeling, and testing / I.M. Ryabov, V.V. Novikov, A.V. Pozdeev, K.V. Chernyshov, and A.S. Mitroshchenko // Tractors and Agricultural Machinery. – 2013. – No. 4. – Pp. 23–26.
8. Experimental studies of shock-absorbing devices of vehicles / I. M. Ryabov, V. V. Vorobyov, R. Yu. Upyr, A. S. Logunov, D. N. Nasnikov // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2009. – No. 2 (22). – Pp. 81–84.
9. Experimental studies of inertial-friction dampers in vehicle suspension systems (Part 1) / I.M. Ryabov, K.V. Chernyshov, S.V. Eliseev, R. Yu. Upir // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2010. – Vol. 42, No. 2. – Pp. 146–154.
10. Pat. 2142585 Russian Federation. Shock absorber / I.M. Ryabov, V.V. Novikov; applicant VolgSTU. – 1999. – Bull. 34.
11. Pat. 2142586 Russian Federation. Shock absorber / I.M. Ryabov, V.V. Novikov; applicant VolgSTU. – 1999. – Bull. 34.
12. Pat. 2313014 Russian Federation. Shock absorber/ I. M. Ryabov, K. V. Chernyshov, V. V. Vorobyev, A. Yu. Sokolov; applicant VolgSTU. – 2007. – Byul. 35.
13. Pat. 2486385 RF, IPC F16F7/10. Shock absorber / V. D. Varfolomeev, V. V. Vlasov, I. M. Ryabov; patent holder V. D. Varfolomeev. – 2013, Byul. № 21 (III part).
14. Bench tests automobile suspension with inertia-friction and hydraulic shock absorbers / A.V. Pozdeev, K. V. Chernyshov, V. V. Novikov, A.M. Kovalev // Energy and resource conservation: industry and transport. – 2025. – № 4 (53). – С. 90–94.

## REFERENCES

Статья поступила в редакцию 02.05.2026, доработана 17.05.2026, подписана в печать 18.05.2026  
The article was submitted 02.05.2026, revised 17.05.2026, accepted for publication 18.05.2026

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. № 18ж. Дата выхода в свет 23.06.2026 г. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 9,42.  
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 284.

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.

ISSN 2500-0586



9 772500 058003 >