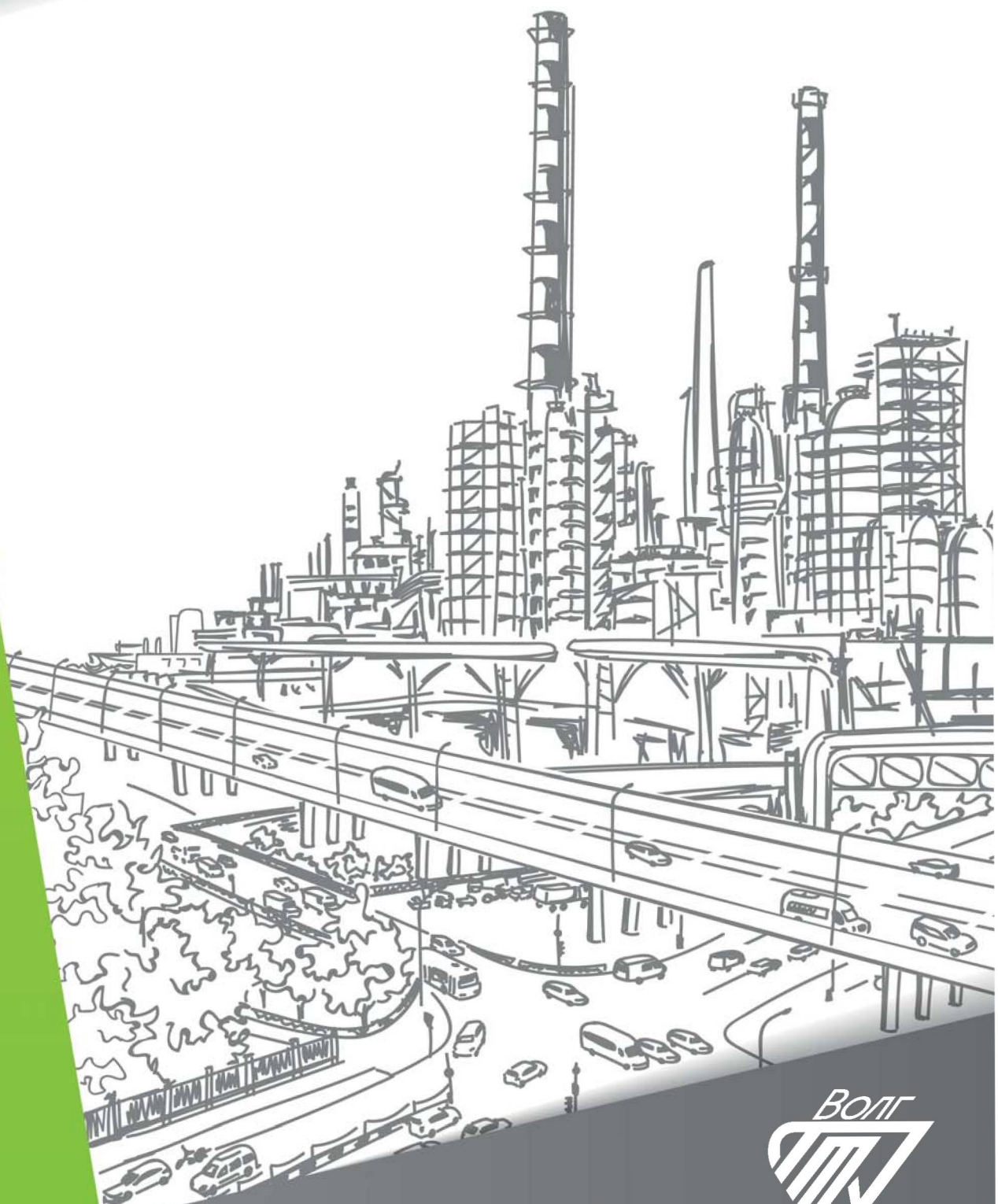


ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 3 (52)
2025



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. ИГиМаш 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
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. Коротаев — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. Котиев — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
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/

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.

№ 3 (52)
Сентябрь
2025

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

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
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
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering),
Prof. BMSTU, Moscow
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 unit-
ed catalog «Press of Russia» – 94193.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/](https://www.pressa-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», 2025

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:
ПН N° (ФС77-64543, registration date: 22 January 2016

**№ 3 (52)
September
2025**

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

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

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| Абросимова А. А. 64 | Нефедьев А. И. 39 |
| Атаманюк Р. Г. 25 | Нигматуллин И. Р. 70 |
| Белоусов Б. Н. 44 | Николаев А. В. 64 |
| Беседин Е. Ю. 25 | Пастухов М. Р. 25 |
| Виноградова Т. В. 64 | Покусаев Б. Г. 6 |
| Воротников И. Н. 31 | Репин С. В. 64 |
| Вязьмин А. В. 11 | Симонов В. Н. 31 |
| Голованов И. Ю. 6, 11 | Скребцова Т. В. 31 |
| Гордиенко В. Е. 64 | Смолко Е. С. 56 |
| Захаров Н. С. 6 | Стрижиченко А. В. 36 |
| Карьялайнен А. Э. 56 | Суркаев А. Л. 19 |
| Козлов Д. А. 70 | Храмцов Д. П. 6 |
| Королев Е. К. 11 | Чечуев В. Е. 64 |
| Лагуткин М. Г. 11 | Шалагинов А. С. 31 |
| Лапенков Р. А. 44 | Шаронов Г. И. 39 |
| Лозовой В. Д. 36 | Шилин А. Н. 25 |
| Малиновский М. П. 44, 56 | Шумова Н. В. 11 |
| Мастепаненко М. А. 31 | Щербин А. М. 44, 56 |
| Мошин А. А. 6 | Яхин А. В. 70 |
| Некрасов Д. А. 6 | |

AUTHOR INDEX

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| Abrosimova A. A. 64 | Nikolaev A. V. 64 |
| Atamanyuk R. G. 25 | Pastukhov M. R. 25 |
| Belousov B. N. 44 | Pokusaev B. G. 6 |
| Besedin E. Y. 25 | Repin S. V. 64 |
| Chechuev V. E. 64 | Shalaginov A. S. 31 |
| Golovanov I. Yu. 6, 11 | Sharonov G. I. 39 |
| Gordienko V. E. 64 | Shcherbin A. M. 44, 56 |
| Karyalaynen A. E. 56 | Shilin A. N. 25 |
| Khramtsov D. P. 6 | Shumova N. V. 11 |
| Korolev E. K. 11 | Simonov V. N. 31 |
| Kozlov D. A. 70 | Skrebtsova T. V. 31 |
| Lagutkin M. G. 11 | Smolko E. S. 56 |
| Lapenkov R. A. 44 | Strizhichenko A. V. 36 |
| Lozovoy V. D. 36 | Surkaev A. L. 19 |
| Malinovsky M. P. 44, 56 | Vinogradova T. V. 64 |
| Mastepanenko M. A. 31 | Vorotnikov I. N. 31 |
| Moshin A. A. 6 | Vyazmin A. V. 11 |
| Nefed'ev A. I. 39 | Yakhin A. V. 70 |
| Nekrasov D. A. 6 | Zakharov N. S. 6 |
| Nigmatullin I. R. 70 | |

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Мошин А. А., Покусаев Б. Г., Голованов И. Ю., Храмцов Д. П., Некрасов Д. А., Захаров Н. С.</i>	
Совершенствование аппаратного оформления процесса объемного культивирования клеток для повышения энергосбережения.....	6
<i>Шумова Н. В., Королев Е. К., Вязьмин А. В., Лагуткин М. Г., Голованов И. Ю.</i>	
Анализ перспективных направлений в конструировании биореакторов для объемного культивирования клеток.....	11
<i>Суркаев А. Л.</i>	
К вопросу о согласованном режиме протекания электрического взрыва металлических проводников.....	19
<i>Шилин А. Н., Атаманюк Р. Г., Беседин Е. Ю., Пастухов М. Р.</i>	
Анализ бесцентровой схемы контроля профилей крупногабаритных оболочек в процессе их формообразования.....	25
<i>Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Скребцова Т. В., Шалагинов А. С., Симонов В. Н.</i>	
Особенности выбора структуры и аппаратной реализации информационно-измерительной системы диагностики неисправностей электротехнологического оборудования при использовании нейросетей.....	31
<i>Стрижиченко А. В., Лозовой В. Д.</i>	
Система мониторинга стрел провеса и гололедообразования на воздушных линиях.....	36
<i>Нефедьев А. И., Шаронов Г. И.</i>	
Измерение параметров комплексного сопротивления двухполюсника в многополюсной электрической цепи.....	39

Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Белоусов Б. Н., Лапенков Р. А., Щербин А. М., Малиновский М. П.</i>	
Краткий анализ конструкций электромеханического тормоза для колесных машин.....	44
<i>Малиновский М. П., Смолко Е. С., Щербин А. М., Карьялайнен А. Э.</i>	
Экспериментальное определение вертикальных реакций на осях натурной модели пятиосного автопоезда с независимой подвеской.....	56
<i>Ретин С. В., Виноградова Т. В., Николаев А. В., Чечуев В. Е., Абросимова А. А., Гордиенко В. Е.</i>	
Обоснование параметров рабочего оборудования погрузчика для уборки городских территорий от снега.....	64
<i>Козлов Д. А., Яхин А. В., Нигматуллин И. Р.</i>	
Обобщенный показатель безотказности моторного масла и его применение в диагностике двигателя.....	70
К сведению авторов.....	79

CONTENTS

Part 1. INDUSTRY

<i>Moshin A. A., Pokusaev B. G., Golovanov I. Yu., Khramtsov D. P., Nekrasov D. A., Zakharov N. S.</i>	
Improvement the apparatus design of the process of volumetric cell cultivation to increase energy saving.....	6
<i>Shumova N. V., Korolev E. K., Vyazmin A. V., Lagutkin M. G., Golovanov I. Yu.</i>	
The analisys of prospective directions in the design of bioreactors for volumetric cell culture.....	11
<i>Surkaev A. L.</i>	
Shock wave of electric explosion of flat foil in cylindrical discharge chamber with air environment.....	19
<i>Shilin A. N., Atamanyuk R. G., Besedin E. Y., Pastukhov M. R.</i>	
Analysis of a centerless control scheme for profiles of large-sized shells in the process of their shaping.....	25
<i>Vorotnikov I. N., Mastepanenko M. A., Skrebtsova T. V., Shalaginov A. S., Simonov V. N.</i>	
Features of the choice of structure and hardware implementation of information and measurement system for diagnostics of faults of electrical technological equipment when using neural networks.....	31
<i>Strizhichenko A. V., Lozovoy V. D.</i>	
Monitoring system for sagging and icing on overhead power lines.....	36
<i>Nefed'ev A. I., Sharonov G. I.</i>	
Measurement the complex resistance parameters of a two-terminal in a multi-terminal electric circuit.....	39

Part 2. TRANSPORT

<i>Belousov B. N., Lapenkov R. A., Shcherbin A. M., Malinovsky M. P.</i>	
Brief analysis of electromechanical brake design for wheeled vehicles.....	44
<i>Malinovsky M. P., Smolko E. S., Shcherbin A. M., Karyalaynen A. E.</i>	
Experimental determination of vertical reactions on the axles of a full-scale model of a five-axle road train with independent suspension.....	56
<i>Repin S. V., Vinogradova T. V., Nikolaev A. V., Chechuev V. E., Abrosimova A. A., Gordienko V. E.</i>	
Justification of the loader working equipment parameters for cleaning urban areas from snow.....	64
<i>Kozlov D. A., Yakhin A. V., Nigmatullin I. R.</i>	
Generalized reliability indicator of engine oil and its application in engine dianostics.....	70

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 663.1

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-6-10

*А. А. Мошин^{1, 2}, Б. Г. Покусаев¹, И. Ю. Голованов²
Д. П. Храмцов¹, Д. А. Некрасов^{1, 2}, Н. С. Захаров¹*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ КЛЕТОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

¹ МИРЭА – Российский технологический университет

² Московский политехнический университет

a.moshin97@mail.ru, pokusaev2005@yandex.ru, igol95@yandex.ru
dp@khramtsov.net, nekrasov55@yandex.ru, nicolazaharov@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

Ввиду широкой применимости биореакторов в химической и смежных отраслях промышленности, их совершенствование для обеспечения лучшего энергосбережения является актуальной задачей современной промышленности. В статье представлена конструкция энергосберегающего биореактора для процесса объемного культивирования клеток микроорганизмов. Эффект энергосбережения достигается за счет использования развитой системы микроканалов во всей рабочей среде биореактора. Усовершенствованная конструкция биореактора запатентована, что подтверждает ее новизну и практическую значимость.

Ключевые слова: биореактор, культивирование клеток, аппаратурное оформление, конструирование, энергосбережение

*A. A. Moshin^{1, 2}, B. G. Pokusaev¹, I. Yu. Golovanov²
D. P. Khramtsov¹, D. A. Nekrasov^{1, 2}, N. S. Zakharov¹*

IMPROVEMENT THE APPARATUS DESIGN OF THE PROCESS OF VOLUMETRIC CELL CULTIVATION TO INCREASE ENERGY SAVING

¹ MIREA – Russian Technological University

² Moscow Polytechnic University

Due to the wide applicability of bioreactors in chemical and related industries, their improvement to ensure better energy saving is an urgent task of modern industry. The article presents the design of an energy-saving bioreactor for the process of volumetric cultivation of microbial cells. The energy-saving effect is achieved through the use of an advanced microchannel system in the entire working environment of the bioreactor. The improved design of the bioreactor is patented, which confirms its novelty and practical significance.

Keywords: bioreactor, cell culture, apparatus design, designing, energy saving

В настоящее время биореакторы нашли широкое применение в химической и смежных отраслях промышленности и используются в качестве альтернативы оборудованию для очистки сточных вод, почв и грунтов, ферментативной переработки отходов растительного и животного происхождения, обезвреживания органических отходов, а также для получения биогаза и биотоплива. Целью использования биореакторов является создание и поддержание благоприятных условий культивирования кле-

ток микроорганизмов. Необходимыми конструктивными элементами биореакторов являются заполняемая рабочей средой емкость, в которой будут культивироваться клетки микроорганизмов, а также элементы жизнеобеспечения для насыщения клеток газовой смесью и отвода метаболитов клеток (продуктов жизнедеятельности) в рабочей среде [1–4].

Основной задачей при культивировании клеток микроорганизмов является получение большого объема биомассы (готового продукта

с живыми микроорганизмами). При этом, с точки зрения происходящих при культивировании микроорганизмов процессов, биореактор – это тепломассообменный аппарат [1]. Таким образом, интенсивность культивирования клеток связана с интенсивностью процессов теплообмена и массообмена, исследованиям которых посвящены отдельные работы [5–10].

Совершенствование аппаратного оформления культивирования клеток для обеспечения лучшего энергосбережения – количества затрачиваемой энергии для культивирования заданного объема готового продукта – является актуальной задачей современной промышленности. Улучшение энергосбережения при культивировании клеток возможно за счет интенсификации теплообмена и массообмена в биореакторе, что в первую очередь возможно путем совершенствования его элементов жизнеобеспечения.

Одним из примеров интенсификации процесса культивирования клеток является снабжение биореактора элементами жизнеобеспечения в виде различных механических устройств, например, для перемешивания рабочей среды или вибрационными устройствами. Однако в механических биореакторах интенсификация процесса сопряжена с усложнением конструкции и ограниченностью в типе культивируемых клеток. При этом энергетические затраты при эксплуатации таких биореакторов наоборот наиболее высокие. Таким образом, за счет ухудшения энергосбережения, механические биореакторы целесообразно использовать только при необходимости обеспечения высокой скорости культивирования некоторых типов клеток.

В биореакторах с одним элементом жизнеобеспечения для одновременного насыщения клеток микроорганизмов газовой воздушной смесью и отвода их метаболитов, например, полые микроканалы [8], мембранные трубки [11], фитили [12], перфорированные трубки [13], в сравнении с механическими, стоит отметить меньшую интенсивность культивирования. Однако такие конструкции не ограничены в типе культивируемых клеток, обладают простой конструкцией и обеспечивают лучшее энергосбережение при культивировании [1].

В процессе эксплуатации биореакторов с одним элементом жизнеобеспечения на его поверхностях формируется биомасса из культивируемых клеток. При достижении опреде-

ленной толщины слоя клеточной биомассы, например, в патенте [11] указывается толщина слоя, равная 1 мм, клетки, соприкасающиеся с поверхностью элемента жизнеобеспечения, ограничены по углеводному питанию, а клетки, контактирующие с рабочей средой, ограничены по питающей газовой воздушной смеси. Таким образом, в рабочей среде постепенно происходит накопление метаболитов, и в благоприятных условиях культивирования находятся только клетки, размещенные в тонком слое вокруг поверхности элемента жизнеобеспечения. Клетки, удаленные от поверхности элемента жизнеобеспечения, подвержены автолизу за счет ограниченного количества газовой воздушной смеси и неравномерности состава питательной среды [1]. Следовательно, обеспечение массообмена во всем объеме рабочей среды возможно при рациональном расположении элементов жизнеобеспечения, с учетом толщины слоя биомассы на их поверхности не более 1 мм [11].

Работа [10] посвящена созданию полых микроканалов в гидрогеле, который может быть использован в качестве рабочей среды биореактора. Микроканалы могут быть созданы с использованием металлических стержней в специальных картриджах на этапе формирования гидрогеля – при его переходе из жидкого состояния в гелеобразное. В данной работе отмечается перспектива возможности массообмена в рабочей среде биореактора за счет создания по всему ее объему развитой системы микроканалов.

Для проверки возможности реализации развитой системы микроканалов в гидрогеле на практике был проведен натурный эксперимент. В кювете размерами 40×10×10 мм был сформирован образец агарозного гидрогеля. На рис. 1 представлены фотографии, визуализирующие процесс поперечной диффузии фуксина в объеме гидрогеля с массовой концентрацией агарозы 1,0 % с разветвленной системой проточных микроканалов.

Для формирования микроканалов в гидрогеле в кювету устанавливали конструкцию, состоящую из иглы диаметром 0,5 мм и двух проволок диаметром 0,3 мм, которые крепились к игле сверху. Затем в кювету наливали раствор для формирования гидрогеля в жидком состоянии при температуре 50–60 °С. В этом случае в течение некоторого интервала температур гидрогель остается в жидком состоянии. После образования гидрогеля конструкцию, состоящую из

иглы и проволоки, извлекали, а в образовавшиеся на их месте полые микроканалы заливали

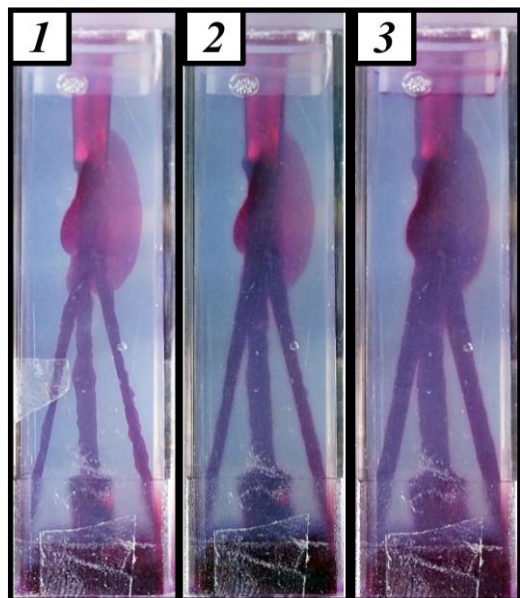


Рис. 1. Поперечная диффузия фуксина в объем гидрогеля с массовой концентрацией агарозы 1,0 % с развитой системой микроканалов диаметром 1 мм при времени:
1 – 1 минута; 2 – 10 минут; 3 – 20 минут

раствор фуксина. Использование фуксина позволяет визуально наблюдать за процессом массообмена в гидрогель из микроканалов (диффузия вещества пурпурного цвета в гидрогель).

Натурный эксперимент подтвердил возможность формирования стабильных микроканалов различной конфигурации в гидрогеле. Микроканалы в гидрогеле не меняют своей формы с течением времени, сохраняют свою конфигурацию и не заполняются гидрогелем. При скорости потока в несколько микролитров в секунду деформаций микроканалов не наблюдалось. Отмечена также неоднородность скорости диффузии фуксина через стенки микроканалов в объем гидрогеля.

В работе [14] предложен способ формирования микроканалов в гидрогеле с помощью фитилей различной толщины с подачей питательных веществ к клеткам по фитилям. Отмечается, что применение фитилей позволяет создавать развитую сеть микроканалов, способствующую массообмену во всем объеме рабочей среды биореактора. Пример конструкции биореактора с фитилями представлен на рис. 2 [12].

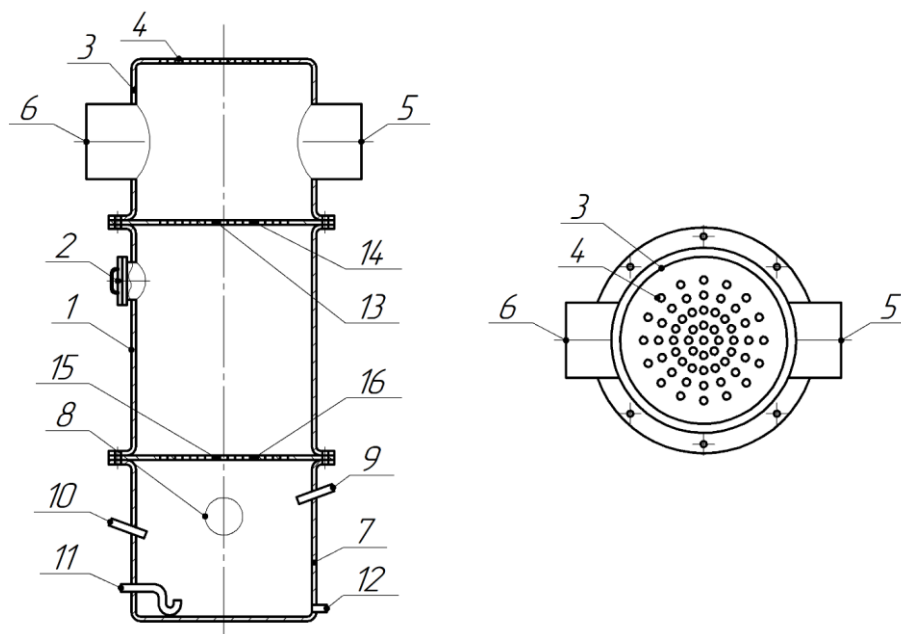


Рис. 2. Конструкция биореактора по патенту [12]:

1 – емкость; 2 – люк; 3 – выпуклая крышка; 4 – отверстия в выпуклой крышке для крепления фитилей; 5 – патрубок ввода горячего воздуха; 6 – патрубок вывода горячего воздуха; 7 – выпуклое днище; 8 – смотровое окно; 9 – патрубок ввода воды; 10 – патрубок вывода воздуха; 11 – барботер; 12 – патрубок слива воды; 13 – верхняя пластина; 14 – отверстия для прохода фитилей в верхней пластине; 15 – нижняя пластина; 16 – отверстия для прохода фитилей в нижней пластине

Биореактор работает следующим образом. В отверстиях 4 выпуклой крышки 3 крепятся фитили и пропускаются через отверстия 14 и 16 в пластинах 13 и 15 соответственно. В выпук-

лом днище 7, заполненном через патрубок 10 водой, уровень воды контролируется с помощью смотрового окна 8, слив воды осуществляется через патрубок слива воды 12. Емкость 1

через люк 2 заполняется гидрогелем с иммобилизованными в нем клетками. Через барботер 11 в выпуклое днище 7 подается воздух, отвод воздуха осуществляется через патрубок 9. В результате вода насыщается кислородом воздуха. Часть фитилей выше пластины 13 обдувается горячим воздухом, поступающим через патрубок 5 и отводящимся через патрубок 6. В результате вода из выпуклого днища 7 за счет капиллярных сил движется вверх по фитилям. Растворенный в воде кислород воздуха вместе с водой через фитиль поступает в объем гидрогеля и диффундирует к иммобилизованным в гидрогель клеткам, что необходимо для их роста и деления. Метаболиты, в свою очередь, поступают обратно в фитиль, растворяются в воде и вместе с ней поднимаются по фитилю. Растворенные в воде метаболиты переходят в газообразное состояние выше пластины 13 при обдуве горячим воздухом, поступающим в выпуклую крышку 3 через патрубок 5, и вместе с парами воды отводится воздухом через патрубок 6.

Биореактор [12] позволяет создавать развитую систему микроканалов с фитилями, однако в его конструкции отсутствуют средства контроля и оценки уровня газовой смеси во всем объеме рабочей среды. Таким образом,

определение достаточности развитости сети микроканалов затруднительно.

Для исключения отмеченного недостатка и с использованием в качестве прототипа конструкции по патенту [12] (рис. 2), был разработан и запатентован биореактор [15], представленный на рис. 3.

Отличительными особенностями данной конструкции, в сравнении с прототипом [12], являются наличие установленных в корпусе 1 газоанализаторов 19 для оценки уровня составляющих газовой смеси и оценки уровня метаболитов в объеме гидрогеля, а также снабжение барботера 11 редуктором с расходомером 20, позволяющим регулировать и управлять количеством подаваемой газовой смеси и, следовательно, позволяющим управлять ее растворенным в воде количеством.

Наличие в биореакторе газоанализаторов и редуктора с расходомером позволит проводить оценку развитости системы микроканалов для получения необходимого качества готового продукта по показателю процента живых клеток микроорганизмов в его объеме, что, например, важно в области трехмерной биопечати [16]. Рациональное распределение системы микроканалов положительно отразится на энергосбережении при эксплуатации биореактора.

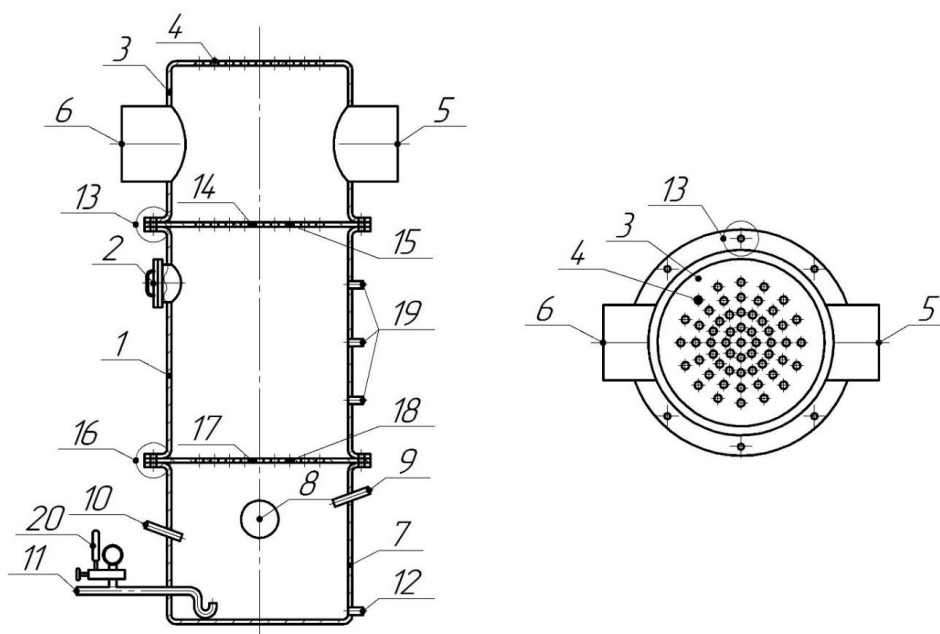


Рис. 3. Конструкция биореактора по патенту [15]:

1 – емкость; 2 – люк; 3 – выпуклая крышка; 4 – отверстия в выпуклой крышке для крепления фитилей; 5 – штуцер подвода горячего воздуха; 6 – штуцер отвода горячего воздуха; 7 – выпуклое днище; 8 – смотровое окно; 9 – штуцер отвода газовой смеси; 10 – штуцер подвода воды; 11 – барботер; 12 – штуцер слива воды; 13, 16 – фланцевые соединения; 14 – верхняя пластина; 15 – отверстия для прохода фитилей в верхней пластине; 17 – нижняя пластина; 18 – отверстия для прохода фитилей в нижней пластине; 19 – газоанализаторы; 20 – редуктор с расходомером

Таким образом, совокупность представленных технических решений позволяет обеспечивать улучшение энергосбережения процесса за счет использования всего объема рабочей среды биореактора путем использования развитой системы микроканалов.

Также важно отметить, что для обеспечения непрерывности культивирования клеток и сохранения культуры в физиологически активном состоянии необходимо поддержание стерильности рабочего объема. Для решения данной задачи могут быть использованы различные микробиологические тесты. Например, тест-системы компании ООО «Биоконтроль ГР» [17] представляют собой пластиковый носитель с нанесенной на него питательной средой, предназначенной для культивирования микроорганизмов и последующего подсчета количества колоний. Такие тесты могут быть использованы для организации, внутреннего контроля и определения микробиологической безопасности биореактора, что влияет на интенсивность культивирования и, следовательно, на энергосбережение при эксплуатации биореактора.

Выводы

1. Проведен натурный эксперимент, подтверждающий массообмен в объеме гидрогеля при использовании системы микроканалов.

2. Представлена конструкция биореактора, обеспечивающая эффективный подвод газовой смеси к клеткам и отвод их метаболитов во всем объеме рабочей среды путем использования развитой системы из фитилей. Новизна и практическая значимость разработанной конструкции биореактора подтверждены патентом РФ 229942.

3. Совокупность представленных технических решений позволяет обеспечивать рост клеток микроорганизмов во всем объеме рабочей среды биореактора при незначительных энергетических затратах, повышая тем самым энергосбережение процесса объемного культивирования клеток.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новоселов, А. Г. Разработка и проектирование ферментационного оборудования для аэробного культивирования одноклеточных микроорганизмов : учеб.-метод. пособие / А. Г. Новоселов [и др.]. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 91 с.
2. Junne, S. How scalable and suitable are single-use bioreactors? / S. Junne, P. Neubauer // Current Opinion in Biotechnology. – 2018. – Vol. 53. – P. 240-247.
3. Винаров, А. Ю. Системный подход к выбору оптимального биореактора / А. Ю. Винаров // Биотехнология: состояние и перспективы развития. – 2015. – С. 337-338.
4. Винаров, А. Ю. Процессы и аппараты биотехнологии: ферментационные аппараты : учеб. пособ. для вузов / А. Ю. Винаров [и др.]; под общ. ред. В. А. Быкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 274 с.
5. Study of hydrogel materials thermophysical properties / B. Pokusaev, N. Zakharov, A. Vyazmin, D. Nekrasov, E. Volkova, A. Moshin // Thermal Science. – 2023. – Vol. 27, № 5A. – P. 3701-3708.
6. Захаров, Н. С. Исследование процессов теплопереноса в гидрогелях методами голографической интерферометрии и градиентной теплометрии / Н. С. Захаров, Б. Г. Покусаев, А. В. Вязьмин, Д. А. Некрасов, О. А. Сулягина, А. А. Мошин // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48, № 9. – С. 10-14.
7. Nonstationary Mass Transfer of Nutrient Medium for Microorganisms in Mixed Gels / D. P. Khramtsov, O. A. Sulyagina, B. G. Pokusaev, A. V. Vyazmin, D. A. Nekrasov, A. A. Moshin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 56, № 5. – P. 669-677.
8. Шумова, Н. В. Исследование процесса гелеобразования, адгезии слоев и интенсификации массообмена с помощью микроканалов в объеме гелей / Н. В. Шумова, Е. Д. Волкова // Бутлеровские сообщения. – 2022. – Т. 71, № 9. – С. 47-56.
9. Шумова, Н. В. Моделирование роста популяции клеток, инкубируемых в объеме гидрогеля с искусственной сетью микроканалов для подачи кислорода / Н. В. Шумова, А. В. Вязьмин, Е. К. Королев // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 2. – С. 61-65.
10. Покусаев, Б. Г. Нестационарный массоперенос питательных веществ в гелях с каналами различной пространственной структуры / Б. Г. Покусаев, А. В. Вязьмин, Н. С. Захаров, Д. П. Храмцов, Д. А. Некрасов // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54, № 2. – С. 163-175.
11. Патент РФ на полезную модель № 117916, МПК C12M 1/00. Биореактор для культивирования клеток, преимущественно эукариотических / Ю. В. Редикульцев. Оpubл. 10.07.2012. Бюл. № 19.
12. Патент РФ на полезную модель № 219502, МПК C12M 1/00; C12M 1/04. Аппарат для объемного культивирования клеток / А. В. Вязьмин, Н. В. Шумова, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов. Оpubл. 20.07.2023. Бюл. № 20.
13. Патент РФ на изобретение № 2430153, МПК C12M 1/04. Биореактор / Д. Ю. Суслов, Л. А. Кушев. Оpubл. 27.09.2011. Бюл. № 27.
14. Вязьмин, А. В. Технология и аппаратное оформление процесса объемного культивирования аэробных клеток в гидрогеле / А. В. Вязьмин, Н. В. Шумова, М. Г. Лагуткин, О. А. Сулягина // Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS «EESTE-2024»): сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума, посвященного 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова. – М.: Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2024. – С. 64-68.
15. Патент РФ на полезную модель № 229942, МПК C12M 1/00; C12M 1/04. Аппарат для объемного культивирования клеток / А. А. Мошин, Б. Г. Покусаев, Д. П. Храмцов, Д. А. Некрасов, И. Ю. Голованов. Оpubл. 06.11.2024. Бюл. № 31.
16. 3D bioprinting for modelling vasculature / P. Sasmal, P. Datta, Y. Wu, I. T. Ozbolat // Microphysiological Systems. – 2018. – Vol. 2, № 9. – P. 1-17.
17. Биоконтроль. Тест-пластина «Грибы, дрожжи, плесени» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biocontrolgr.ru/tproduct/929357605492-test-plastina-gribi-drozhzhi-pleseni> (дата обращения: 09.11.2024 г.).

УДК 663.15

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-11-19

Н. В. Шумова¹, Е. К. Королев¹, А. В. Вязьмин¹, М. Г. Лагуткин^{1, 2}, И. Ю. Голованов²

**АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ
В КОНСТРУИРОВАНИИ БИОРЕАКТОРОВ
ДЛЯ ОБЪЕМНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ КЛЕТОК**

¹МИРЭА – Российский технологический университет²Московский политехнический университет

donatra@yandex.ru, av1958@list.ru, lag53@yandex.ru, koroleveg24@gmail.com
igol95@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

Важным направлением совершенствования всех отраслей промышленности является развитие энерго- и ресурсосберегающих технологий, что включает в себя разработку и использование технических устройств различного назначения, обеспечивающих высокую эффективность проводимого процесса при сокращении затрат ресурсов на изготовление устройства и затрат на проведение процесса. Разработка новых устройств, как и совершенствование существующих, невозможна без критического анализа накопленного опыта при создании и эксплуатации известных и перспективных устройств. Оценка достоинств и недостатков различных конструкций позволяет выявить наиболее перспективные направления их дальнейшего совершенствования. В статье проведен обзор и анализ различных отечественных и зарубежных конструкций биореакторов, используемых для объемного культивирования клеток микроорганизмов. На основании проведенного анализа выявлены наиболее перспективные направления в конструировании биореакторов, а также предложены и запатентованы новые конструкции.

Ключевые слова: биореактор, ферментер, культивирование клеток, обзор патентов, перспективные конструкции биореакторов

N. V. Shumova¹, E. K. Korolev¹, A. V. Vyazmin¹, M. G. Lagutkin^{1, 2}, I. Yu. Golovanov²

**THE ANALYSIS OF PROSPECTIVE DIRECTIONS IN THE DESIGN
OF BIOREACTORS FOR VOLUMETRIC CELL CULTURE**

¹MIREA – Russian Technological University²Moscow Polytechnic University

An important area of improvement in all industries is the development of energy-saving and resource-saving technologies. The area includes the development and use of technical devices for various purposes that ensure high efficiency of the process while reducing the cost of resources for manufacturing the device and the cost of the process. The development of new devices, as well as the improvement of existing ones, is impossible without a critical analysis of the accumulated experience in the creation and operation of well-known and promising devices. An assessment of the advantages and disadvantages of various designs allows us to identify the most promising areas for their further improvement. The article presents an overview and analysis of various domestic and foreign bioreactor designs used for volumetric cultivation of microbial cells. Based on the analysis, the most promising areas in the design of bioreactors have been identified, and new designs have been proposed and patented.

Keywords: bioreactor, fermenter, cell culture, patent review, prospective bioreactor designs

Биореакторы применяются в различных отраслях промышленности с целью создания наиболее благоприятных условий для жизнедеятельности культивируемых клеток микроорганизмов. Как правило, биотехнологические процессы реализуются в жидкой фазе, содержащей питательную среду, при постоянном перемешивании и в некоторых случаях при аэрации. Перемешивание считается необходимым процессом для снятия диффузионных ограничений на массоперенос питательных веществ от среды к клеткам. Обычно биореакторы классифици-

руются по способу перемешивания на механические, газо-вихревые, аэрлифтные (барботажные), аэробные (с подачей газовой смеси), анаэробные (без подачи газовой смеси) и комбинированные – аэробно-анаэробные [1–4].

Например, биореакторы большой единичной мощности используются для аэробной и анаэробной очистки сточных вод (в том числе с большим количеством илового осадка). Конструкции таких биореакторов для аэробной очистки включают резервуары с узлом аэрации (к примеру, в виде эжектора), устройства обра-

ботки сточной воды кавитацией низкой интенсивности, трубопроводы подачи и отвода обрабатываемой жидкости. Конструкции биореакторов для осуществления анаэробной очистки наиболее близки к отстойникам. В качестве примеров биореакторов очистки сточных вод можно привести конструкции, представленные в источниках [2; 3; 5–11].

Цель работы: на основе критического обзора и анализа различных отечественных и зарубежных конструкций биореакторов, используемых для объемного культивирования клеток микроорганизмов, выявить наиболее перспективные направления в конструировании биореакторов.

Известны конструкции биореакторов для ферментативной переработки отходов растительного и животного происхождения (к примеру, опавшей листвы) для получения из них биогаза и удобрений. Такие биореакторы включают емкости – камеры брожения, выполняемые либо герметично (для осуществления анаэробного процесса), либо с нагнетательным устройством газовой смеси (например, барботером) и отводом биогаза. В ряде конструкций также предложены решения по отводу тепла в процессе брожения с целью получения энергии. Примером биореакторов ферментативной переработки отходов являются запатентованные конструкции [12–21].

Отдельно можно выделить биореакторы ферментативной переработки, направленные на очистку и обезвреживание органических отходов. Такие аппараты, в частности, могут использоваться для биоремедиации нефтезагрязненных суспензий, почв и грунтов. Пример биореактора такого типа представлен в патенте [22].

Стоит отметить и конструирование биореакторов для получения биотоплива. Например, в патентах [23–25] описаны конструкции, в которых возможно получение биодизельного топлива.

Биореакторы также используются для культивирования и автоматизированного извлечения из питательного субстрата личинок различных насекомых: в частности, конструкции по патентам [26–33].

Одной из современных областей применения биореакторов является технология трехмерной биопечати, используемой в медицине, микробиологической промышленности и биотехнологии. В данном направлении используются конструкции для объемного культивиро-

вания клеток [34]. Получаемый в таких биореакторах продукт с иммобилизованными клетками может использоваться для трехмерной печати тканей и органов.

Важно отметить, что сопровождающие культивирование микроорганизмов процессы позволяют рассматривать биореактор как тепло-массообменный аппарат, а интенсивность его работы может быть связана с интенсивностью теплообмена и массообмена [35]. Изучению процессов теплообмена и массообмена в рабочей среде биореакторов посвящены отдельные исследования [36–38].

Создание благоприятных условий для жизнедеятельности культивируемых клеток в таких биореакторах включает обеспечение дыхания, подвода питания и отвода метаболитов клеток путем равномерного перемешивания газовой и жидкой составляющих содержимого биореактора, в связи с чем в его конструкции обязательны следующие элементы [1–3]:

1) емкость, в которой будут культивироваться клетки микроорганизмов, заполняемая, например, водным раствором;

2) устройства, обеспечивающие распределение газовой смеси в емкости для насыщения ею клеток микроорганизмов, например, перфорированные трубки или перемешивающее устройство внутри емкости;

3) устройства, обеспечивающие отвод метаболитов из емкости, что также может быть реализовано перфорированными трубками или перемешивающим устройством внутри емкости.

Конструирование новых биореакторов направлено, в первую очередь, на совершенствование данных элементов (к примеру, решения по увеличению полезного объема емкости с сохранением габаритных размеров биореактора и обеспечение равномерного подвода газовой смеси и отвода метаболитов микроорганизмов по всему объему емкости).

Для обеспечения непрерывности культивирования клеток необходима стерильность рабочего объема биореактора. Внутренний контроль стерильности и микробиологической безопасности биореактора может проводиться с использованием различных тест-систем (например, от компании ООО «Биоконтроль ГР» [39]).

Ввиду малой чувствительности прокариотических клеток к внешнему воздействию, конструирование биореакторов для их культивирования в большей степени направлено на ускорение роста клеток за счет повышения эффек-

тивности насыщения клеточной массы газовой смесью. В качестве примеров осуществления процессов, включающих стадию культивирования прокариотических клеток, можно привести способ получения полипептида по патенту [40] и способ продуцирования белка интерлейкина-21 по патенту [41].

Для осуществления повышенной эффективности насыщения клеточной массы газовой смесью предложены конструкции биореакторов с механическим перемешиванием рабочей среды, например по патентам [42–50]. Рассмотрим более подробно механический биореактор для объемного культивирования клеток на примере одной из запатентованных конструкций [43] (рис. 1).

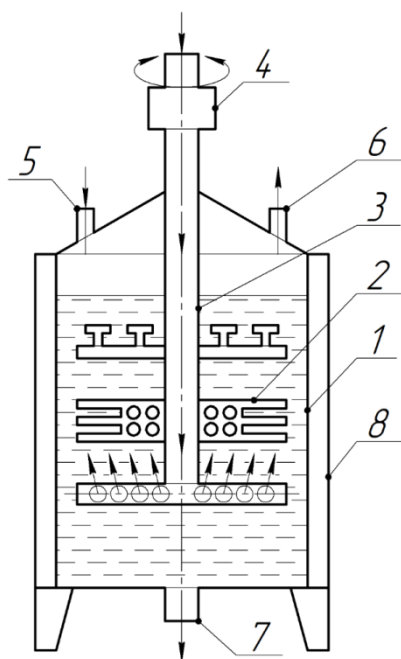


Рис. 1. Конструкция механического биореактора по патенту [43]:

1 – емкость; 2 – перемешивающее устройство; 3 – полый вал; 4 – калорифер; 5 – патрубок ввода питательной среды; 6 – патрубок вывода газовой смеси; 7 – патрубок вывода готового продукта; 8 – теплообменная рубашка

Данная конструкция включает вертикальную емкость 1 и размещенное внутри нее перемешивающее устройство 2, состоящее из трех мешалок, ярусно укрепленных на полом валу 3. Верхняя мешалка выполнена в виде перфорированного диска с укрепленными на нем Т-образными элементами. Средняя мешалка представляет собой прямоугольную пластину с отверстиями и прорезями. Нижняя мешалка выполнена в виде полых перфорированных трубок и в поперечном сечении имеет кресто-

образную форму. Полый вал 3 соединен с установленным на нем калорифером 4. Для ввода питательной среды, вывода газовой смеси и вывода готового продукта используются патрубки 5, 6 и 7, соответственно. Емкость 1 снабжена теплообменной рубашкой 8.

Биореактор работает следующим образом: через патрубок 5 емкость 1 заполняется питательной средой. Через теплообменную рубашку 8 осуществляется подогрев рабочей среды. Полый вал 3 с перемешивающим устройством 2 может приводиться во вращение с помощью электродвигателя. Подогретый в калорифере 4 воздух с температурой 40–45 °С нагнетается в полый вал 3 и выводится через перфорацию нижней мешалки в рабочую среду. Получаемая газовая смесь выводится через патрубок 6. Вывод готового продукта осуществляется через патрубок 7.

Рост клеток микроорганизмов происходит при поддержании температурного режима в пределах 30–37 °С, постоянной подаче воздуха и непрерывном перемешивании рабочей среды.

К достоинствам механических биореакторов можно отнести возможность эксплуатации с любым типом рабочей среды (включая вязкую и жидкую) и обеспечение высокого темпа роста клеток. Основным недостатком таких конструкций является ограниченность в типе культивируемых клеток, ввиду оказываемого на клетки воздействия:

- 1) механического – перемешивающим устройством;
- 2) кавитации – при перемешивании жидких сред;
- 3) теплового – при дополнительном подогреве рабочей среды, предлагаемом в ряде конструкций, в том числе представленной на рис. 1.

Среди недостатков стоит отметить и невозможность равномерного перемешивания всей рабочей среды, что приводит к гибели части клеток. Следовательно, часть объема рабочей среды биореактора не используется. По этой причине в ряде предлагаемых биореакторов в первую очередь описываются новые конструкции перемешивающих устройств, например, по патентам [43; 51–59]. Так как неравномерность роста клеток в вязкой и гелеобразной средах наблюдается в поперечном сечении биореактора, а в жидких средах – в продольном сечении, предлагаемые решения направлены на повышение эффективности перемешивания только отдельного типа рабочей среды. В боль-

шей степени такие конструкции рекомендуются к использованию с вязкими средами.

К биореакторам с механическим перемешиванием рабочей среды для суспензионного культивирования клеток тканей или микроорганизмов можно отнести конструкции по патентам [60; 61] (рис. 2).

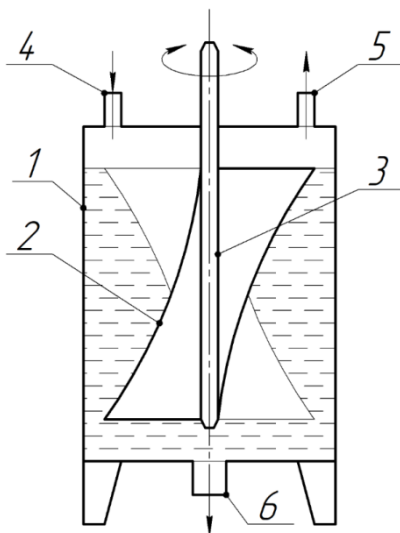


Рис. 2. Конструкция биореактора по патенту [60]: 1 – емкость; 2 – перемешивающее устройство; 3 – вал; 4 – патрубок ввода питательной среды; 5 – патрубок вывода газовой смеси; 6 – патрубок вывода готового продукта

Данные конструкции эксплуатируются только с жидкой рабочей средой, при этом обеспечивается более равномерное перемешивание среды, в сравнении с использованием конструкции по рис. 1. Помимо ограниченности в типе используемой среды, эксплуатация таких биореакторов связана с образованием пены, вследствие чего конструкции усложняются различными пеногасителями.

К механическим биореакторам относятся конструкции, оснащенные вибрационными устройствами, например, по патентам [62; 63]. Данные конструкции представляют собой две (или более) емкости, где перемешивание и аэрация культуральной жидкости производится путем вибрации одной из емкостей. Вторая и дополнительные емкости могут быть снабжены выступами и перегородками. Вибрационные биореакторы используются, в первую очередь, для культивирования клеток фототрофных микроорганизмов. Перемешивание жидкости в тонком слое без образования большого количества пены обеспечивает доступ свету во всем объеме жидкости, что является необходимым условием для роста фототрофов.

Среди механических биореакторов отдельно можно выделить конструкции для культивирования клеток в условиях невесомости, направленные на использование в космической биотехнологии, например, по патентам [64; 65]. Перемешивание рабочей среды в таких конструкциях осуществляется вращением емкости биореактора либо возвратно-поступательным движением внутри нее поршня.

Для перемешивания суспензии и выравнивания распределения клеток в ее объеме предложены конструкции газо-вихревых биореакторов [4; 66–68] (рис. 3).

В газо-вихревых биореакторах перемешивание осуществляется квазистационарным потоком с осевым противотоком, который создается аэрирующим газовым вихрем за счет перепада давления над поверхностью и силы трения воздушного потока о поверхность суспензии. Они эффективны при использовании жидких сред различной вязкости, в частности, при культивировании клеток тканей и микроорганизмов в жидких средах повышенной вязкости или при увеличивающейся вязкости в процессе перемешивания.

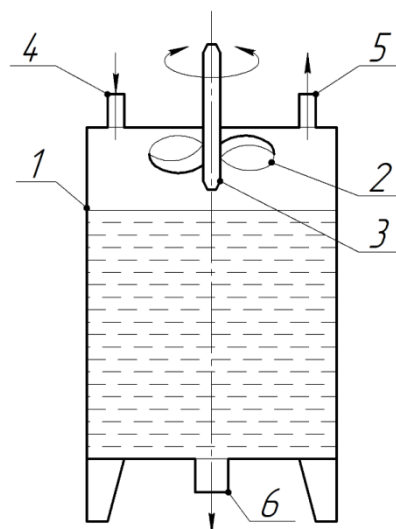


Рис. 3. Пример конструкции газо-вихревого биореактора: 1 – емкость; 2 – перемешивающее устройство; 3 – вал; 4 – патрубок ввода питательной среды; 5 – патрубок вывода газовой смеси; 6 – патрубок вывода готового продукта

Основным недостатком таких конструкций является необходимость развития большой скорости вращения перемешивающего устройства для создания вихревого потока над поверхностью рабочей среды, что связано с высокими энергетическими затратами. Чем больше высота слоя рабочей среды, тем большая ско-

рость вращения необходима (для создания воздушного столба в рабочей среде). При недостаточной скорости вращения перемешивающего устройства в рабочей среде будут образовываться застойные зоны, рост клеток в которых невозможен.

При высоких скоростях движения газа над поверхностью рабочей среды происходит захват капель с культивируемыми клетками и выброс их к стенке емкости, что приводит к гибели части клеток.

Можно выделить общие недостатки механических и газо-вихревых биореакторов:

- 1) сложность конструкций, что повышает затраты на изготовление биореактора;
- 2) наличие подвижных элементов и вибрационных устройств увеличивает габаритные размеры биореактора и негативно сказывается на его эксплуатационной надежности;
- 3) повышенные энергетические затраты при эксплуатации биореактора;
- 4) ограниченность в типе культивируемых клеток.

В целом, данные направления в конструировании биореакторов можно считать перспективными для использования в условиях, когда наиболее важно обеспечить максимальные темпы роста клеток с малой чувствительностью к внешнему воздействию (лабораторные исследования, очистка почв и сточных вод в промышленных объемах).

Перспективны данные направления и в создании мобильных биореакторов, одна из конструкций которых представлена в патенте [51]. Дальнейшее совершенствование данной конструкции может заключаться в снабжении биореактора теплообменной рубашкой, которая позволит поддерживать температуру рабочей среды наиболее благоприятной для культивирования клеток. Это позволит защитить рабочую среду как от воздействия внешней среды, так и от перегрева в случае значительного тепловыделения в процессе культивирования. Размещение конструкции на самоходном шасси с источником энергии позволит эксплуатировать такой биореактор в автоматизированном режиме для устранения последствий локальных экологических катастроф, например, для обезвреживания почв и сточных вод в местах разлива нефти.

Отличительными особенностями эукариотических клеток являются малые темпы роста и большая чувствительность к тепловому и меха-

ническому воздействию. Такие свойства клеток оказывают существенное влияние на конструирование биореакторов, в частности, на конструкцию элементов для насыщения клеточной массы газовой смесью и отвода метаболитов. Для культивирования эукариотических клеток предлагаются конструкции аэрлифтных биореакторов, в которых перемешивание рабочей среды осуществляется путем продувки газовой смеси через рабочую жидкость (барботажное перемешивание). Стоит отметить, что в ряде механических биореакторов, в том числе, представленном на рис. 1, дополнительное перемешивание рабочей среды осуществляется барботером (в конструкции на рис. 1 в качестве барботера используется нижняя мешалка).

В конструкциях по патентам [69; 70] подача газовой смеси осуществляется в центр нижней части емкости. Такое решение не позволяет добиться равномерного распределения газовой смеси по всему объему рабочей среды и приводит к нежелательному пенообразованию на ее поверхности. Также в подобных конструкциях возможно образование больших пузырьков газовой смеси, которые могут приводить к гибели части клеток. Пример такой конструкции представлен на рис. 4.

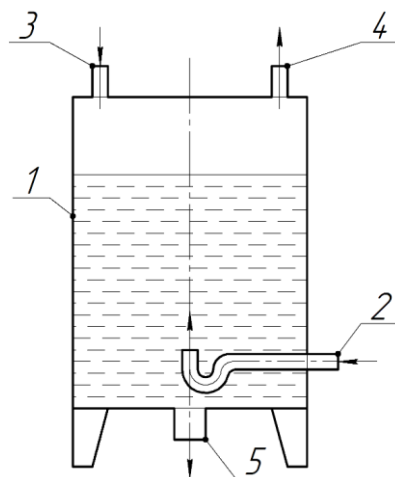


Рис. 4. Пример конструкции биореактора с барботером в нижней части емкости:

1 – емкость; 2 – барботер; 3 – патрубок ввода питательной среды; 4 – патрубок вывода газовой смеси; 5 – патрубок вывода готового продукта

Более равномерного распределения газовой смеси и уменьшения пенообразования позволяют добиться конструкции с расположенными внутри емкости перфорированными трубками, кольцами и змеевиками, например по патентам [71–73] (рис. 5).

Газовая смесь подается в трубки и выводится через их перфорацию по всему объему рабочей смеси. Недостатком биореакторов данного типа является неравномерность вывода пузырьков газа по высоте емкости, а также возможность образования больших пузырьков.

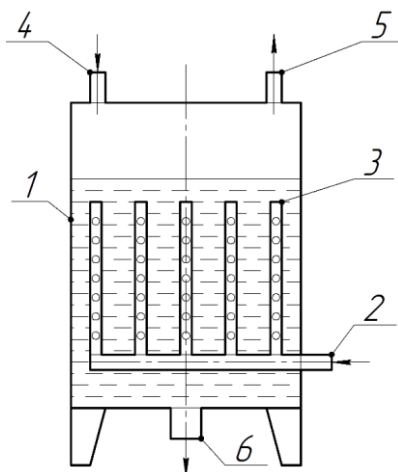


Рис. 5. Пример конструкции биореактора с перфорированными трубками:

1 – емкость; 2 – патрубок ввода газовой смеси; 3 – перфорированные трубки; 4 – патрубок ввода питательной среды; 5 – патрубок вывода газовой смеси; 6 – патрубок вывода готового продукта

Отмеченные недостатки могут быть решены в мембранных биореакторах. В таких конструкциях используются трубки, стержни или листы из газопроницаемого полимерного мате-

риала, например, конструкции по патентам [74; 75]. В процессе культивирования клеток через поры мембраны в виде мельчайших пузырьков просачивается аэрирующая газовая смесь, а метаболиты впитываются в мембрану и выводятся из рабочей смеси.

Существенным недостатком мембранных биореакторов является низкая производительность. Это связано с тем, что в рабочей жидкости происходит накопление метаболитов, так как в благоприятных условиях культивирования находятся только клетки, размещенные в тонком слое вокруг поверхности мембраны, а клетки, удаленные от ее поверхности, подвержены автолизу за счет ограниченного количества кислорода и неравномерности состава питательной среды. При этом составляющие подаваемой газовой смеси имеют разную растворимость, что существенно затрудняет создание и поддержание заданного соотношения растворенных газов в рабочей среде, в результате чего производительность биореактора также снижается.

В конструкции по патенту [76] исключены застойные зоны путем рационального распределения мембран в объеме рабочей среды, однако проблема поддержания заданного соотношения растворенных газов в рабочей среде не решается.

Для исключения недостатков рассмотренных биореакторов разработана и запатентована конструкция, представленная на рис. 6 [77].

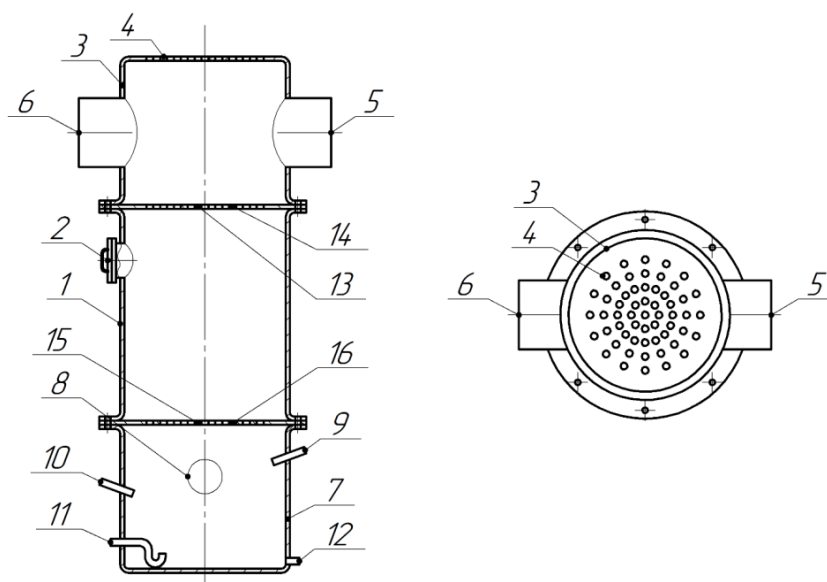


Рис. 6. Конструкция биореактора с фитилями [77]:

1 – емкость; 2 – люк; 3 – выпуклая крышка; 4 – отверстия в выпуклой крышке для крепления фитилей; 5 – патрубок ввода горячего воздуха; 6 – патрубок вывода горячего воздуха; 7 – выпуклое днище; 8 – смотровое окно; 9 – патрубок ввода воды; 10 – патрубок вывода воздуха; 11 – барботер; 12 – патрубок слива воды; 13 – верхняя пластина; 14 – отверстия для прохода фитилей в верхней пластине; 15 – нижняя пластина; 16 – отверстия для прохода фитилей в нижней пластине

Биореактор работает следующим образом. В отверстиях 4 выпуклой крышки 3 крепятся фитили и пропускаются через отверстия 14 и 16 в пластинах 13 и 15, соответственно. В выпуклом днище 7, заполненном через патрубок 10 водой, уровень воды контролируется с помощью смотрового окна 8, слив воды осуществляется через патрубок слива воды 12. Емкость 1 через люк 2 заполняется гидрогелем с иммобилизованными в нем клетками. Через барботер 11 в выпуклое днище 7 подается воздух, отвод воздуха осуществляется через патрубок 9. В результате вода насыщается кислородом воздуха. Часть фитилей выше пластины 13 обдувается горячим воздухом, поступающим через патрубок 5 и отводящимся через патрубок 6. В результате вода из выпуклого днища 7 движется вверх по каналам вдоль фитилей. Растворенный в воде кислород воздуха вместе с водой через каналы для фитилей поступает в объем гидрогеля и диффундирует к иммобилизованным в нем клеткам, что необходимо для их роста и деления. Метаболиты, в свою очередь, поступают обратно в канал, растворяются в воде и вместе с ней поднимаются вверх вдоль фитиля. Растворенные в воде метаболиты переходят в газообразное состояние выше пластины 13 при обдуве горячим воздухом, поступающим в выпуклую крышку 3 через патрубок 5, и вместе с парами воды отводится воздухом через патрубок 6.

Таким образом, предложенная конструкция биореактора повышает метаболизм клеток микроорганизмов, иммобилизованных в гидрогеле за счет обеспечения эффективного подвода кислорода к клеткам и отвода метаболитов во всем объеме гидрогеля.

Разработанная конструкция исключает недостатки механических и газо-вихревых биореакторов (механическое и тепловое воздействие на клетки и действие на них кавитации), исключает недостатки известных аэрлифтных биореакторов (сложность в поддержании заданного соотношения растворенных газов в рабочей среде, малая производительность ввиду наличия застойных зон в объеме биореактора), а также повышает энерго- и ресурсосбережение как в сравнении с известными механическими и газо-вихревыми, так и с аэрлифтными биореакторами.

Данная конструкция в виде совокупности устройств (калорифера, нагнетателя воздуха и ветвящихся фитилей) запатентована в качестве изобретения [78].

Выбор рациональной конструкции биореактора определяет проектировщик в зависимости

от конкретной среды, производительности. Основной задачей при этом является снижение за назначенный срок службы биореактора суммарных энергетических затрат на проведение процесса объемного культивирования клеток и сам биореактор. В ряде случаев следует рассмотреть и возможность использования тепла биореакции. При наличии эмпирических зависимостей по расчету объемных коэффициентов массоотдачи, коэффициентов теплоотдачи определить наиболее рациональную конструкцию и параметры биореактора можно аналитически. Если такие зависимости отсутствуют, потребуются дополнительные экспериментальные исследования.

Выводы

1. Проведен обзор и критический анализ различных отечественных и зарубежных конструкций биореакторов и ферментеров для объемного культивирования клеток микроорганизмов. На примере отдельных конструкций отмечены преимущества и недостатки запатентованных решений по совершенствованию биореакторов.

2. Наиболее перспективным направлением при совершенствовании биореакторов является создание конструкции, снабженной элементом, обеспечивающим одновременные дыхание, подвод питания и отвод метаболитов клеток, не подвергающим клетки тепловому или механическому воздействию. Таким требованиям наиболее близко соответствуют аэрлифтные (барботажные) биореакторы и биореакторы с фитилями.

3. На основании проведенного обзора и анализа конструкций биореакторов и ферментеров указаны конструкции, обеспечивающие равномерность дыхания, подвода питания и отвода метаболитов клеток во всем их объеме за счет развитой сети микроканалов, получаемой путем снабжения биореактора вертикально расположенными фитилями. Подвод питания и отвод метаболитов клеток вдоль фитилей осуществляется с использованием капиллярного эффекта. Новизна и практическая значимость разработанных конструкций подтверждены патентами на полезную модель и изобретение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Junne, S. How scalable and suitable are single-use bioreactors? / S. Junne, P. Neubauer // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2018. – Vol. 53. – P. 240-247.
2. Винаров, А. Ю. Системный подход к выбору оптимального биореактора / А. Ю. Винаров // *Биотехнология: состояние и перспективы развития*. – 2015. – С. 337–338.
3. Винаров, А. Ю. Процессы и аппараты биотехнологии: ферментационные аппараты: учеб. пособ. для вузов /

- А. Ю. Винаров [и др.]; под. общ. ред. В. А. Быкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 274 с.
4. Рамазанов, Ю. А. Универсальные газо-вихревые биореакторы нового поколения – один из эффективных инструментов ускоренного развития промышленной биотехнологии / Ю. А. Рамазанов // Биотехнология: состояние и перспективы развития. – 2015. – С. 287–289.
5. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – С. 649–650.
6. Патент США № 4454038. Apparatus for biological treatment of waste water in downflow operation. Оpubл. 12.06.1984.
7. Патент КНР № 101376553. Method for processing low temperature sewerage using low-intensity ultrasonic strengthened membrane bioreactor. Оpubл. 04.03.2009.
8. Патент РФ на изобретение № 2064450. Биореактор. Оpubл. 27.07.1996.
9. Патент РФ на изобретение № 2073355. Биореактор. Оpubл. 10.02.1997.
10. Патент РФ на полезную модель № 92004. Биореактор. Оpubл. 10.03.2010.
11. Патент РФ на изобретение № 2430153. Биореактор. Оpubл. 26.10.2011.
12. Авторское свидетельство СССР № 1763484. Биореактор. Оpubл. 23.09.1992.
13. Авторское свидетельство СССР № 1798334. Биореактор. Оpubл. 28.02.1993.
14. Патент Франции № 2471124. Anaerobic fermentation of liq. manure to produce gas and fertiliser - in horizontal cylindrical digester with axial rotary agitator. Оpubл. 19.06.1981.
15. Патент США № 20100112700. Large scale disposable bioreactor. Оpubл. 06.05.2010.
16. Патент РФ на изобретение № 2062299. Биореактор. Оpubл. 20.06.1996.
17. Патент РФ изобретение № 2084514. Биореактор. Оpubл. 20.07.1997.
18. Патент РФ на изобретение № 2093565. Биореактор. Оpubл. 20.10.1997.
19. Патент РФ на изобретение № 2540019. Биореактор. Оpubл. 27.01.2015.
20. Патент РФ на полезную модель № 172478. Энергоэффективный биореактор с использованием композитных материалов. Оpubл. 11.07.2017.
21. Патент РФ на изобретение № 2700490. Биореакторная установка для анаэробной обработки органических отходов животного и растительного происхождения с получением органических удобрений и биогаза. Оpubл. 17.09.2019.
22. Патент РФ на полезную модель № 149931. Биореактор для биодеструкции органических отходов. Оpubл. 27.01.2015.
23. Патент КНР № 2099763. Air-lift type fermentation reactor. Оpubл. 25.03.1992.
24. Патент КНР № 1583601. Reactor with anaerobic suspension bed. Оpubл. 23.02.2005.
25. Патент РФ на изобретение № 2411288. Эрлифтный петлевой биореактор без использования внешних газов. Оpubл. 10.02.2011.
26. Авторское свидетельство СССР № 843898. Садок для насекомых. Оpubл. 07.07.1981.
27. Патент РФ на полезную модель № 103442. Садок для разведения насекомых. Оpubл. 20.04.2011.
28. Патент РФ на полезную модель № 142515. Садок для насекомых. Оpubл. 27.06.2014.
29. Патент РФ на полезную модель № 164529. Молярный. Оpubл. 10.09.2016.
30. Патент РФ на полезную модель № 203173. Биореактор для культивирования и сортировки личинок большой восковой моли (*Galleria mellonella* L.). Оpubл. 24.03.2021.
31. Патент РФ на полезную модель № 209069. Биотехнологический модуль для выращивания личинок большой восковой моли (ЛБВМ). Оpubл. 31.01.2022.
32. Патент КНР № 207054542. *Galleria mellonella* waxmoth larva case. Оpubл. 02.03.2018.
33. Патент КНР № 109362651. Device and method for collecting *Galleria mellonella* eggs. Оpubл. 22.02.2019.
34. 3D bioprinting for modelling vasculature / P. Sasmal, P. Datta, Y. Wu, I. T. Ozbolat // *Microphysiological Systems*. – 2018. – Vol. 2, № 9. – P. 1–17.
35. Новоселов, А. Г. Разработка и проектирование ферментационного оборудования для аэробного культивирования одноклеточных микроорганизмов: учеб.-метод. пособие / А. Г. Новоселов [и др.]. – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2014. – 91 с.
36. Захаров, Н. С. Исследование процессов теплопередачи в гидрогелях методами голографической интерферометрии и градиентной теплотометрии / Н. С. Захаров, Б. Г. Покусаев, А. В. Вязьмин, Д. А. Некрасов, О. А. Сулягина, А. А. Мошин // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48, № 9. – С. 10–14.
37. Nonstationary Mass Transfer of Nutrient Medium for Microorganisms in Mixed Gels / D. P. Khramtsov, O. A. Sulyagina, B. G. Pokusaev, A. V. Vyazmin, D. A. Nekrasov, A. A. Moshin // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 56, № 5. – P. 669–677.
38. Шумова, Н. В. Исследование процесса гелеобразования, адгезии слоев и интенсификации массообмена с помощью микроканалов в объеме гелей / Н. В. Шумова, Е. Д. Волкова // Бутлеровские сообщения. – 2022. – Т. 71, № 9. – С. 47–56.
39. Биоконтроль. Тест-пластина «Грибы, дрожжи, плесени» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biocontrolgr.ru/tproduct/929357605492-test-plastina-gribi-drozhzhi-pleseni> (дата обращения: 09.11.2024 г.).
40. Патент РФ на изобретение № 2015114092. Способ получения полипептидов в периплазме прокариотических клеток. Оpubл. 10.11.2016.
41. Патент РФ на полезную модель № 2354703. Продуцирование il-21 в прокариотических клетках-хозяевах. Оpubл. 10.05.2009.
42. Авторское свидетельство СССР № 661004. Ферментер. Оpubл. 05.05.1979.
43. Патент РФ на полезную модель № 98002. Аппарат для культивирования микроорганизмов. Оpubл. 27.09.2010.
44. Патент РФ на изобретение № 2035505. Биореактор для культивирования фотосинтезирующих микроорганизмов. Оpubл. 20.05.1995.
45. Патент РФ на изобретение № 2299903. Биореактор. Оpubл. 27.05.2007.
46. Патент РФ на изобретение № 2610674. Биореактор для проведения биохимических процессов. Оpubл. 14.02.2017.
47. Патент РФ на изобретение № 2245915. Аппарат для культивирования микроорганизмов. Оpubл. 10.02.2005.
48. Патент РФ на полезную модель № 85479. Аппарат для проведения ферментационных процессов. Оpubл. 10.08.2009.
49. Патент РФ на изобретение № 2664860. Биореактор для интенсивного процесса выращивания аэробных микроорганизмов. Оpubл. 23.08.2018.
50. Патент Великобритании № 1499410. Method of fermentation using tubular fermentors incorporating wall scrapers. Оpubл. 01.02.1978.

51. Патент США № 20130101982. Fluid mixing systems with adjustable mixing element. Оpubл. 25.04.2013.
52. Патент США № 4256839. Reactor system such as a fermentation system. Оpubл. 17.03.1981.
53. Патент США № 20090142827. Mixing apparatus and container for such. Оpubл. 04.06.2009.
54. Патент США № 20120164720. Biogas plant and service device for a biogas plant. Оpubл. 28.06.2012.
55. Патент США № 20120040449. Disposable bioreactor and use-once stirring system. Оpubл. 16.02.2012.
56. Патент США № 20020105856. Apparatus and method for mixing materials sealed in a container under sterile conditions. Оpubл. 08.08.2002.
57. Патент РФ на полезную модель № 175407. Ферментатор для культивирования микроорганизмов. Оpubл. 04.12.2017.
58. Патент РФ на изобретение № 2704229. Биореактор с конструктивным решением, включающим в себя множественные или настраиваемые по положению перемешивающие устройства. Оpubл. 24.10.2019.
59. Патент РФ на полезную модель № 72480. Аппарат для культивирования микроорганизмов. Оpubл. 20.04.2008.
60. Патент США № 4289854. Cell culture method and apparatus. Оpubл. 15.09.1981.
61. Патент РФ на изобретение № 2050415. Биореактор для культивирования клеток на микроносителях. Оpubл. 20.12.1995.
62. Патент РФ на изобретение № 2450049. Способ культивирования фототрофов и установка для его осуществления. Оpubл. 10.05.2012.
63. Патент РФ на полезную модель № 157532. Биореактор вибрационный. Оpubл. 10.12.2015.
64. Авторское свидетельство СССР № 822791. Аппарат для выращивания хлореллы. Оpubл. 23.04.1981.
65. Патент РФ на полезную модель № 2360958. Реактор для проведения биотехнологических процессов в условиях невесомости. Оpubл. 10.07.2009.
66. Авторское свидетельство СССР № 376436. Ферментер. Оpubл. 05.04.1973.
67. Патент РФ на изобретение № 2135579. Аппарат для суспензионного культивирования клеток тканей и микроорганизмов. Оpubл. 27.08.1999.
68. Патент РФ на изобретение № 2363729. Аппарат для суспензионного культивирования клеток тканей или микроорганизмов. Оpubл. 18.02.2008.
69. Патент Великобритании № 1546554. Method of and apparatus for cultivating animal and human tissue cells. Оpubл. 23.05.1979.
70. Патент РФ на полезную модель № 132075. Биореактор для культивирования аэробных бактерий (варианты). Оpubл. 10.09.2013.
71. Патент РФ на полезную модель № 100769. Биореактор для промышленного культивирования клеток растений в глубоинной суспензии. Оpubл. 27.12.2010.
72. Патент РФ на изобретение № 2144952. Аппарат для выращивания микроорганизмов. Оpubл. 27.01.2000.
73. Патент РФ на изобретение № 2743581. Ферментационная установка для культивирования метаноокисляющих бактерий *Methylococcus capsulatus*. Оpubл. 20.02.2021.
74. Патент РФ на изобретение № 2446205. Биореактор вытеснения с мембранным устройством подвода газового питания. Оpubл. 27.03.2012.
75. Патент РФ на изобретение № 2596396. Биореактор с мембранным устройством газового питания микроорганизмов. Оpubл. 10.09.2016.
76. Патент РФ на полезную модель № 117916. Биореактор для культивирования клеток, преимущественно эукариотических. Оpubл. 10.07.2012.
77. Патент РФ на полезную модель № 219502. Аппарат для объемного культивирования клеток. Оpubл. 20.07.2023.
78. Патент РФ на изобретение № 2805366. Аппарат для объемного инкубирования клеток. Оpubл. 16.10.2023.

УДК 532.59-537.52

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-19-24

А. Л. Суркаев

К ВОПРОСУ О СОГЛАСОВАННОМ РЕЖИМЕ ПРОТЕКАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ

Волгоградский государственный технический университет

alsurkaev@mail.ru

Автор, ответственный за переписку:

Анатолий Леонидович Суркаев, alsurkaev@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований электрического взрыва алюминиевых (Al) и медных (Cu) проводников в воздушной среде. Используя элементы теории размерности, предложено уточненное соотношение, позволяющее оценить длину цилиндрического взрывающегося проводника для формирования согласованного режима протекания электрического взрыва. Получены осциллограммы разрядного тока и напряжения электрического взрыва, протекающего в согласованном (оптимальном) режиме, который характеризуется полной реализацией электрической энергии конденсаторного накопителя в первой половине электрического разряда. Представленное соотношение удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, электрический взрыв проводников, согласованный режим, пояс Роговского, делитель напряжения

A. L. Surkaev

SHOCK WAVE OF ELECTRIC EXPLOSION OF FLAT FOIL IN CYLINDRICAL DISCHARGE CHAMBER WITH AIR ENVIRONMENT

Volgograd State Technical University

The paper presents the results of experimental studies of electric explosion of aluminum (Al) and copper (Cu) conductors in air. Using elements of dimensional theory, a refined relationship is proposed that allows estimating the length of a cylindrical exploded conductor to form a coordinated mode of electric explosion. Oscillograms of the discharge current and voltage of an electric explosion occurring in a coordinated (optimal) mode are obtained, which is characterized by the complete implementation of the electric energy of the capacitor storage in the first half of the electric discharge. The presented relationship is in satisfactory agreement with the experimental results.

Keywords: information and measuring system, electrical explosion of conductors, coordinated mode, Rogowski coil, voltage divider

Введение

В различных отраслях промышленного производства в современном мире находят широкое применение разрядно-импульсные технологии (РИТ). Перспективными направлениями в использовании РИТ [1–4] являются, в частности: разрушение многообразного минерального сырья и горных пород, дезинтеграция геологических проб, различных руд, очистка питьевой и технической воды от физико-химических и бактериологических загрязнений; очистка от накипи и отложений теплообменных поверхностей различного вида энергетического оборудования и т. д. В процессе электрического разряда в окружающем пространстве генерируется взрывная ударная волна, воздействующая на объект обработки. Дальнейшее развитие РИТ требует наличие достоверной информации о физических процессах и явлениях, на которых основываются рассматриваемые технологии, что предопределяет необходимость разработки и создания приборов и устройств, а в комплексе – информационно-измерительных систем (ИИС), регистрирующих необходимые физико-технические характеристики процессов. В качестве объекта исследования выступает, в частности, электрический разряд (ЭР) и электрический взрыв проводника (ЭВП), параметры которых фиксируются соответствующими измерительными элементами информационно-измерительной системы. Описание физико-технических аспектов электрического разряда (ЭР), электрического взрыва проводников (ЭВП) и генерируемых ударных волн представлено широким спектром работ [5–7]. В работе [7] авторами представлена классификация электрического взрыва металлических проводников, согласно которой процесс электрического взрыва подразделяется на медленный, быстрый и сверхбыстрый скин-режим, а также дана трактовка подобной класси-

фикации, которая обосновывается представленными экспериментальными результатами. Также следует отметить работу [8], в которой авторами представлен свой взгляд на механизм электрического взрыва в контексте получения мелкодисперсных порошков наноразмерных масштабов. В частности, при рассмотрении ЭВП авторы исходят из условий увеличенного значения сопротивления жидкого проводника по сравнению с волновым сопротивлением, а также то, что при нагревании проводник не должен разрушаться под воздействием МГД-неустойчивости (магнито-гидродинамическая неустойчивость), что определенным образом сказывается на результате получения мелкодисперсных частиц металла. Авторами [9] представлены приближенные расчетные соотношения, позволяющие оценить момент наступления электрического взрыва медного проводника определенных геометрических размеров. Получены амплитудно-временные параметры импульса перенапряжения на электрически взрывающемся проводнике в атмосферном воздухе и критического значения интеграла действия тока. Результаты экспериментов по воздействию на медный провод большого импульсного затухающего синусоидального тока микросекундной длительности показали, что полученные соотношения для основных характеристик электрического взрыва исследуемого проводника могут быть использованы в теории и практике высоких электротехнологий.

Взрывающийся элемент в виде проводника различных геометрических форм и материалов используется для стабилизации и возможности вариации мощности электрического разряда, получения металлической плазмы, возбуждения ударных волн заданных профилей волнового фронта и т. д. При этом параметры взрывающегося металла и разрядного контура играют определенную роль непосредственно на про-

цесс электрического взрыва и, соответственно, на конечный результат.

Целью работы является экспериментальное подтверждение состоятельности предложенного соотношения, определяющего длину взрывающегося цилиндрического проводника, при которой обеспечивается одно из условий формирования согласованного режима электрического взрыва микросекундного масштаба – эффективное преобразование энергии электрического поля конденсаторной батареи в энергию ударно-волнового возмущения.

Согласованный режим взрыва проводников

Согласно [10], согласованный режим ЭВП представляет собой процесс протекания электрического взрыва, определяемый параметрами разрядного контура и взрывающегося проводника, при котором энергия конденсаторной батареи реализуется в течение первого полупериода разряда. В этом случае практически вся мощность электрического разряда поглощается активным сопротивлением взрывающегося металла. Таким образом, эффективное преобразование энергии электрического поля конденсаторной батареи в энергию гидродинамического возмущения осуществляется при протекании электрического взрыва в согласованном (оптимальном) режиме. Мелкодисперсные структуры, полученные методом ЭВП с учетом протекания процесса взрыва близким к согласованному, рассмотрены в работах [11; 12]. Наиболее удачные и часто цитируемые [13–15] условия согласованного режима электрического взрыва цилиндрических проводников были получены [6]:

$$d_{opt} = \beta \left(\frac{W_0}{\gamma_{cond} \sigma_{cond} (\lambda_{cond} + \chi_{cond}) \sqrt{L/C}} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

$$\ell_{opt} = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}, \quad (2)$$

где W_0 – запасенная энергия конденсаторной батареи; U_0 – начальное напряжение; C – емкость батареи; L – индуктивность контура; γ_{cond} , σ_{cond} – плотность и удельная электропроводность, λ_{cond} , χ_{cond} – удельная теплота плавления и парообразования проводника. Выражения (1) и (2), полученные эмпирически в ходе анализа многочисленных экспериментальных данных, убедительно согласуются с результатами экспериментов в достаточно широком временном интервале, в частности, для микро-

секундных и наносекундных взрывов. При использовании энергетических установок, работающих в миллисекундном диапазоне, конкретно, в качестве примера, с конденсаторами большой емкости $C = 2000 \text{ мкФ}$ и индуктивностью, и сравнительно невысоким начальным напряжением $U_0 = 6 \text{ кВ}$, предложенное [6] соотношение (1) достаточно убедительно согласуется с экспериментом. Соотношение (2) требует дополнительных уточнений. Аналогичный результат наблюдается и для маломощной энергетической установки с параметрами: $W_0 = 640 \text{ Дж}$, $U_0 = 2 \text{ кВ}$, $C = 320 \text{ мкФ}$. Следует заметить, что в выражении (2) не отражены физические свойства взрывающегося металла, как это сделано в выражении (1), из чего следует равенство длин цилиндрических проводников вне зависимости от характеристик металла. Используя элементы теории размерности, предложено несколько скорректированное выражение, связывающее длину взрывающегося цилиндрического проводника с параметрами разрядного контура и физическими характеристиками взрывающегося металла:

$$\ell_{opt} = \frac{\alpha U_0 R \sqrt[4]{LC}}{z \sqrt{\rho_{cond} \gamma_{cond} (\chi_{cond} + \lambda_{cond})}}, \quad (3)$$

где $\alpha \approx 10^2$ и $\beta \approx 1,9 \div 2,1$ – некоторые поправочные коэффициенты, которые, вероятно, могут зависеть от запасаемой энергии и от физико-химических свойств металлов, в частности от потенциала ионизации, подвижности электронов и т. д.; $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L + \frac{1}{\omega C}\right)^2}$, R , $z = \sqrt{L/C}$ – полное, активное и волновое сопротивление разрядного контура, соответственно; $\rho_{cond} = \frac{1}{\sigma_{cond}}$ – удельное сопротивление проводника. В первоисточнике [6] коэффициент $\beta = 1$, в то время как [16] коэффициент $\beta = 2$, что согласуется с результатами расчетов (1).

Экспериментальные исследования и результаты

Накопителем электрической энергии, как энергетическим элементом в информационно-измерительной системы (ИИС), является генератор импульсных токов (ГИТ) конденсаторного типа [17]. Максимальное зарядное напряжение генератора импульсных токов $U_0 = 3 \text{ кВ}$, электрическая емкость $C = 2200 \text{ мкФ}$, запасаемая

мая энергия $W = 10 \text{ кДж}$, период разряда короткого замыкания $T \approx 800 \text{ мкс}$, скорость нарастания тока $dI/dt \approx 0,25 \text{ А/нс}$. Разрядный ток и напряжение электрического взрыва фиксируются поясом Роговского (ПР) и делителем напряжения (ДН), сигналы которых регистрируются цифровым запоминающим двухканальным электронным осциллографом (ЭО). В экспериментах использован двухканальный запо-

минающий цифровой осциллограф марки GWINSTEK GDS-810S, имеющий оперативную связь с персональным компьютером (ПК).

В качестве объекта исследований выступали алюминиевые (Al) и медные (Cu) проводочки цилиндрической геометрии. В таблице представлены основные параметры взрывающихся металлов и полученные результаты расчетов, в соответствии с выражениями (1) и (3).

Основные параметры взрывающихся металлов

Параметры Металл	$U_{\max}, \text{кВ}$	$C_{\max}, \text{мкФ}$	$W, \text{кДж}$	$R, \text{Ом}$	$\chi, \text{кДж/кг}$	$\lambda, \text{кДж/кг}$	$\ell_{\text{созл}}, \text{мм}$	$d_{\text{созл}}, \text{мм}$
Алюминий (Al)	2,7	2200	8,0	0,13	390	10900	23,3	1,16
Медь (Cu)	2,7	2200	8,0	0,13	213	4820	24,3	0,96

В процессе экспериментов исследовались режимы согласованности протекания электрического взрыва проводочных алюминиевых (Al) и медных (Cu) проводников (ЭВП) в атмосферном воздухе. Согласно выражениям (1) и (3), при геометрических размерах взрывающегося алю-

миниевого (Al) проводника $d_{\text{созл}} \approx 1,1 \div 1,5 \text{ мм}$, $\ell_{\text{созл}} \approx 210 \div 230 \text{ мм}$ (рис. 1) и медного проводника (Cu) $d_{\text{созл}} \approx 0,9 \div 0,95 \text{ мм}$, $\ell_{\text{созл}} \approx 210 \div 230 \text{ мм}$ (рис. 3) реализуются одни из условий согласованного режима электрического взрыва.



Рис. 1. Характерные осциллограммы разрядного тока – 1 и напряжения – 2 согласованного режима электрического взрыва алюминиевого (Al) проводника. Диаметр $d_{\text{созл}} = 1,23 \text{ мм}$, длина $\ell_{\text{созл}} = 220 \text{ мм}$, начальное напряжение $U_0 = 2,6 \text{ кВ}$. ПТ – пауза тока

Осциллограммы разрядного тока и напряжения наглядно иллюстрируют полную реализацию электрической энергии конденсаторного накопителя в первой половине периода разряда, минимальное значение или отсутствие «обратного» тока, наличие ярко выраженной «паузы тока», говорящей о моменте «собственно» взрыва проводника (ЭВП) и формировании ударной волны (УВ). В качестве примера пока-

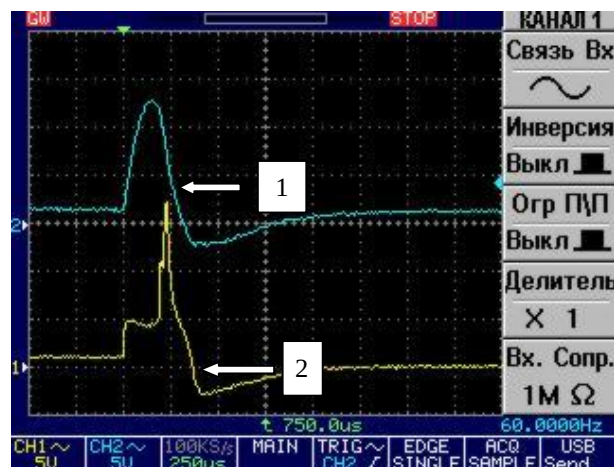


Рис. 2. Характерные осциллограммы разрядного тока – 1 и напряжения – 2 близкого к согласованному режиму электрического взрыва алюминиевого (Al) проводника. Диаметр $d_{\text{созл}} = 1,5 \text{ мм}$, длина $\ell_{\text{созл}} = 160 \text{ мм}$, начальное напряжение $U_0 = 2,6 \text{ кВ}$

заны осциллограммы близкого к согласованному (оптимальному) режиму протекания электрического взрыва алюминиевого (рис. 2) и медного (рис. 4) проводника. На осциллограммах наблюдается наличие «обратного» тока значительной величины, преждевременное и (или) позднее относительно максимума разрядного тока диспергирование металла и нарушение металлической проводимости, то есть возник-

новение собственно взрыва. На рис. 5 показаны графики мощности $P(t)$ электрического взрыва в согласованном режиме для алюминиевого (Al) проводника (рис. 5, а) и медного (Cu) проводни-

ка (рис. 5, б), которые достаточно идентичны, и анализ которых позволяет оценить введенную энергию в проводник $W_{Al} \approx 7,52 \text{ кДж}$ и $W_{Cu} \approx 7,03 \text{ кДж}$, соответственно.

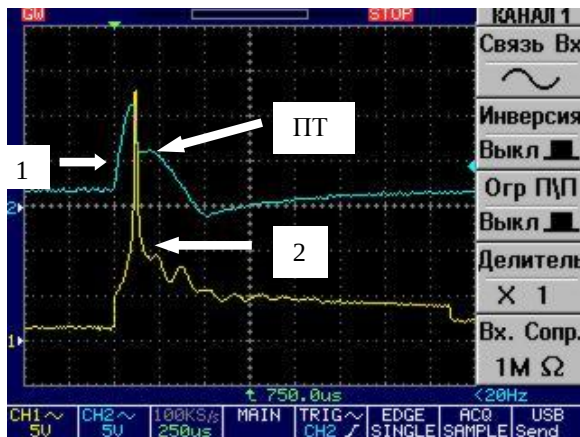


Рис. 3. Характерные осциллограммы разрядного тока – 1 и напряжения – 2 согласованного режима электрического взрыва медного (Cu) проводника. Диаметр $d_{\text{созл}} = 0,92 \text{ мм}$, длина $\ell_{\text{созл}} = 220 \text{ мм}$, начальное напряжение $U_0 = 2,6 \text{ кВ}$. ПТ – пауза тока

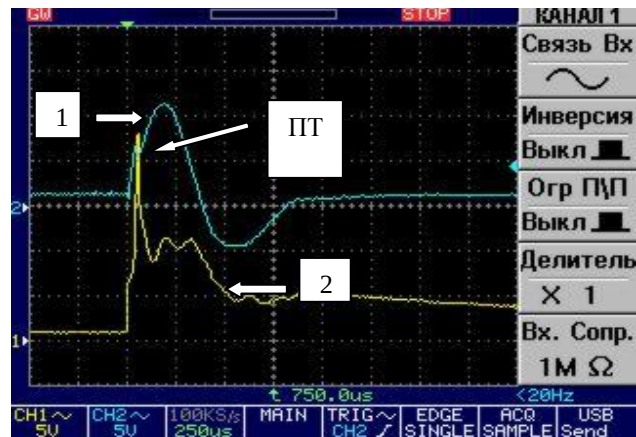


Рис. 4. Характерные осциллограммы разрядного тока – 1 и напряжения – 2 близкого к согласованному режиму электрического взрыва медного (Cu) проводника. Диаметр $d_{\text{созл}} = 0,42 \text{ мм}$, длина $\ell_{\text{созл}} = 95 \text{ мм}$, начальное напряжение $U_0 = 2,6 \text{ кВ}$. ПТ – пауза тока

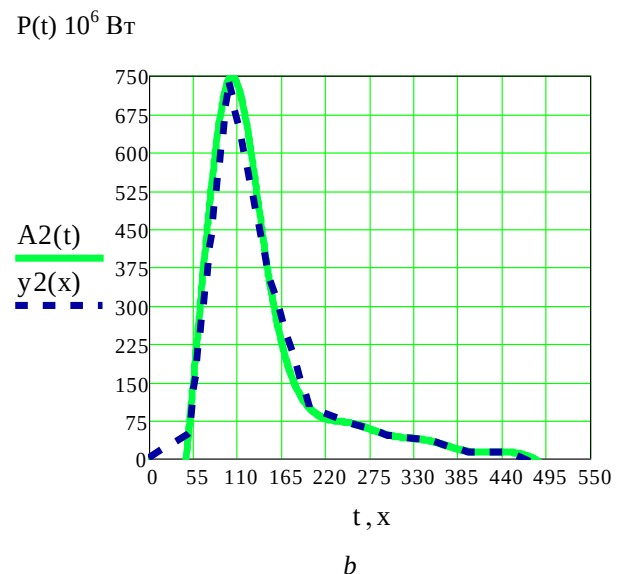
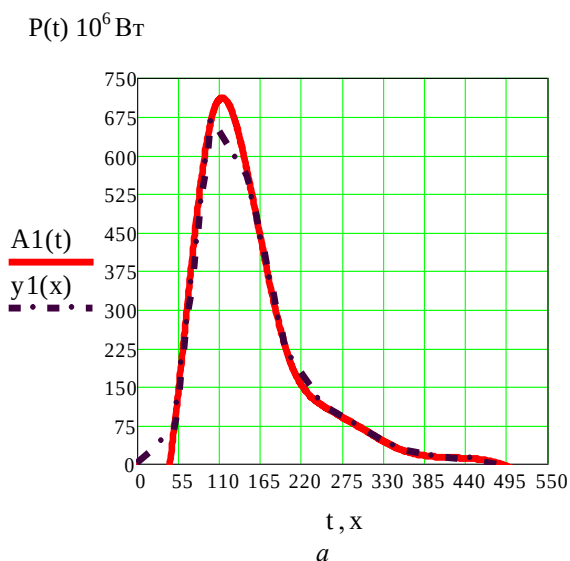


Рис. 5. Графики мощности $P(t)$ для алюминиевой (Al) проволоки (а) и медной проволоки (б) при условии согласованного режима протекания электрического взрыва

Соотношения (1) и (2), предложенные [6], позволяют оценить параметры взрывающихся проводников в жидкой диэлектрической среде. Параметры проводников, взрывающихся в воздушной среде, корректируются автором [18] путем учета критерия подобия и введения некоторых коэффициентов – постоянных множи-

телей. Полученные расчеты, несомненно, успешно согласуются с результатами проводимых экспериментов с энергетическими установками соответствующих указанных параметров, но, тем не менее, в рассматриваемом математическом соотношении не присутствуют физико-химические свойства взрывающихся

металлов. Кроме того, одним из основных параметров электрического взрыва металлов является интеграл удельного действия тока $H = \int j^2 dt$ [19, 20]. Используя осциллограммы (рис. 1; рис. 3) и графики (рис. 5) произведена оценка интеграла удельного действия тока для рассматриваемых металлов, которая составила для алюминия $H_{Al} = 1,43 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \text{ c} / \text{m}^4$ и для меди $H_{Cu} = 2,99 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \text{ c} / \text{m}^4$, что убедительно согласуется с результатами авторов.

Заключение

Таким образом, в работе предложено математическое выражение, учитывающее основные физические свойства взрывающегося металла и позволяющее оценить длину цилиндрического проводника для формирования согласованного режима протекания электрического взрыва. Представлены результаты экспериментов в виде характерных осциллограмм разрядного тока и напряжения электрического взрыва алюминиевых и медных проводников, которые иллюстрируют реальность того, что процесс электрического взрыва проводника протекает в согласованном (оптимальном) режиме, что подтверждает обоснованность предлагаемого соотношения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Малюшевский, П. П.* Основы разрядно-импульсной технологии / П. П. Малюшевский. – Киев: Наукова думка, 1983. – 270 с.
2. *Гулый, Г. А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г. А. Гулый. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.
3. *Малюшевский, П. П.* Разрядно-импульсная технология извлечения топливосодержащих масс из объекта «Укрытие» / П. П. Малюшевский, В. И. Купный, С. М. Тихоненко и др. // Электронная обработка материалов. – 2002, № 3. – С. 62–75.
4. *Галаветдинов, В. З.* Эффективность применения разрядно-импульсной технологии в сложных геологических условиях / В. З. Галаветдинов, Б. Ю. Давиденко, В. Я. Еремин // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. – № 3/2015. – С. 181–186.
5. *Бурцев, В. А.* Электрический взрыв проводника и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 217 с.
6. *Кривицкий, Е. В.* Динамика электровзрыва в жидкости / Е. В. Кривицкий. – Киев: Наук. думка, 1986. – 205 с.
7. *Иваненков, Г. В.* Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек в вакууме / Г. В. Иваненков, С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко и др. Часть 1. Препринт 9. – М: ФИАН, 2004. – 26 с.
8. Kravchenko N. Yu., Kovtunov S. S. Studying the mechanism of electric explosion of metal conductors / journals. rudn.ru/miph DOI: 10.22363/2658-4670-2023-31-1-75-86.
9. *Баранов, М. И.* Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника / М. И. Баранов, В. О. Лысенко // «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» № 4. 2013. – С. 24–30.
10. Bennett F.D., Burden H.S., Shear // Phys. Fluids. – 1962. – № 5. – P. 102.
11. *Суркаев, А. Л.* Исследование микроразмерных металлических структур, полученных методом электрического взрыва проводника / А. Л. Суркаев, М. М. Кумыш, В. И. Усачев и др. // Инженерный вестник Дона, 2019. – № 4 (55). – С. 2.
12. *Суркаев, А. Л.* Исследование микроразмерных металлических структур, полученных методом электрического взрыва проводника (часть 2) / А. Л. Суркаев, М. М. Кумыш, В. И. Усачев и др. // Инженерный вестник Дона, 2019. – № 8 (59). – С. 11.
13. *Хайнацкий, С. А.* Условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в жидкости / С. А. Хайнацкий // Письма в ЖТФ, 2009. – Т. 35. – Вып. 7. – С. 15–20.
14. *Кускова, Н. И.* О получении ультрадисперсных порошков металлов при электрическом взрыве проводников в жидкости. Часть II. Оптимальный режим взрыва / Н. И. Кускова, В. Ю. Бакларь, С. А. Хайнацкий // Электронная обработка материалов, 2009. – № 3. – С. 21–27.
15. *Богуславский, Л. З.* Электронная обработка материалов / Л. З. Богуславский, А. В. Синчук, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова, 2019. – № 55(5). – С. 10–23. DOI: 10.5281/zenodo.3522291.
16. *Смирнов, А. П.* Экспериментальные исследования гидродинамических и энергетических характеристик высоковольтного электрохимического взрыва в ограниченных объемах жидкости / А. П. Смирнов, О. В. Хвоцан // Электронная обработка материалов, 2023. – № 59(5). – С. 42–55.
17. *Суркаев, А. Л.* Элементы физики электрического взрыва проводников в газообразных и конденсированных средах / А. Л. Суркаев, М. М. Кумыш, В. И. Усачев, Д. А. Канцдалов, С. И. Благинин. – Волгоград: изд. ВолгГТУ, 2021. – 204 с.
18. *Хайнацкий, С. А.* Исследование оптимального режима электрического взрыва проводников в воде и воздухе / С. А. Хайнацкий // Электронная обработка материалов, 2009. – № 5. – С. 57–64.
19. *Месяц, Г. А.* Эктонны в вакуумном разряде / Г. А. Месяц. – М.: Наука, 2000.
20. *Орешкин, В. И.* Перегревные неустойчивости при электрическом взрыве проводников / В. И. Орешкин // ПЖТФ. – Т. 35, вып. 1, 2009. – С. 76–82.

УДК 681.142.37

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-25-31

*А. Н. Шилин, Р. Г. Атаманюк, Е. Ю. Беседин, М. Р. Пастухов***АНАЛИЗ БЕСЦЕНТРОВОЙ СХЕМЫ КОНТРОЛЯ
ПРОФИЛЕЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБОЛОЧЕК
В ПРОЦЕССЕ ИХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

shanvstu@gmail.com, atamanuk17@gmail.com, egorka-besedin2004@mail.ru

mixail.nbox@list.ru

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Шилин, shanvstu@gmail.com

В статье изложен анализ существующих методов и средств контроля геометрических параметров крупногабаритных оболочек вращения – обечаек. На основе анализа разработан метод измерения кривизны контура и диаметра обечайки. Метод измерения диаметра основан на свойстве круга о том, что диаметр представляет собой максимальное расстояние между двумя точками окружности внутри круга. Измерительное устройство измерения диаметра содержит дальномер, который закреплен на перемещающейся по контуру каретке с возможностью сканирования противоположного участка внутренней поверхности детали, результаты измерения расстояний запоминаются в блоке управления и из измеренных результатов выбирается максимальное значение, которое и является диаметром в данном продольном сечении.

Ключевые слова: крупногабаритные обечайки, контроль размеров обечаек, оптико-электронные приборы, лазерные дальномеры

*A. N. Shilin, R. G. Atamanyuk, E. Y. Besedin, M. R. Pastukhov***ANALYSIS OF A CENTERLESS CONTROL SCHEME
FOR PROFILES OF LARGE-SIZED SHELLS
IN THE PROCESS OF THEIR SHAPING****Volgograd State Technical University**

The article presents an analysis of existing methods and means of controlling the geometric parameters of large-sized rotating shells. Based on the analysis, a method for measuring contour curvature and shell diameter has been developed. The diameter measurement method is based on the property of a circle that the diameter is the maximum distance between two points of a circle inside the circle. The measuring device for measuring the diameter contains a rangefinder, which is mounted on a carriage moving along the contour with the ability to scan the opposite section of the inner surface of the part, the distance measurement results are stored in the control unit and the maximum value is selected from the measured results, which is the diameter in this longitudinal section.

Keywords: large-sized shells, shell size control, optoelectronic devices, laser rangefinders

Введение

В атомном машиностроении, выпускающем крупногабаритное энергетическое оборудование, основными базовыми деталями являются оболочки вращения – обечайки. Эти детали изготавливают методом давления на валковых листогибочных машинах из листового материала. На первом этапе производства выполняется гибка и сварка обечайки, после этого выполняется калибровка (правка) на валковых листогибочных с целью придания ей правильной цилиндрической формы, а затем чистовая обработка обечайки на металлорежущих станках. После сварки обечайка имеет отклонения от правильной цилиндрической формы с преобладанием эллипсной формы. Информация о фор-

ме детали необходима для управления технологическим процессом ее калибровки, поскольку алгоритм управления основан на информации о первоначальной форме. Регистрацию формы обечайки возможно совместить с ее вращением в валках листогибочной машины. В этом случае при регистрации формы изделия возникает методическая погрешность, обусловленная перемещением центра обечайки при ее вращении в валках машины и неравномерностью угловой скорости ее вращения.

Объект исследования

Цилиндрические корпуса нефтегазового оборудования собирают с помощью сварки из базовых деталей – обечаек и днищ. Технология сборки корпусов влияет на производительность

установки внутренних узлов, качество и эксплуатационные характеристики выпускаемой продукции. Наибольшее влияние на характеристики оборудования оказывают уровни рабочих напряжений в обечайках. Основное влияние на степень концентрации напряжений оказывает относительное смещение кромок стыкуемых обечаек корпуса оборудования перед их сваркой. Это смещение, регламентируемое по ОСТ 26.291-87, измеряется по срединной поверхности в стыковых соединениях. Оно определяется формой сечения обечаек, их взаимным расположением [1–2], и не должно превышать 10 % толщины листов обечаек (не более 3 мм). Еще более жесткие требования предъявляют к кольцевым и продольным швам на биметалличе-

ских сосудах со стороны коррозионностойкого слоя. Кроме того, продольные швы смежных обечаек и швы днищ в сосудах ряда групп должны быть смещены относительно друг друга на величину трехкратной толщины наиболее толстого элемента, но не менее 100 мм между осями швов. Поскольку величина допуска на изготовление обечайки составляет 1 % от ее номинального диаметра, а смещение кромок регламентируется толщиной листового материала, то при больших габаритах корпусов ограничение на величину смещения кромок не всегда выполнимо. Разрешение данного противоречия возможно за счет индивидуального подбора стыкуемых обечаек и их относительного углового расположения (рис. 1).

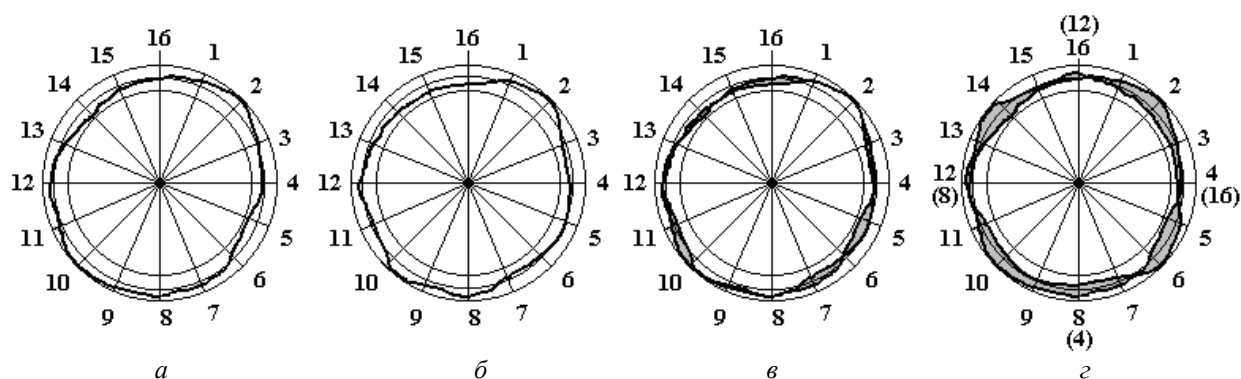


Рис. 1. Схема сборки корпуса цилиндрического аппарата:
а и б – пара стыкуемых обечаек; в и г – варианты сборки пары

Для минимизации величин смещения кромок по периметру при их сборке разработана компьютерная программа, позволяющая по дискретным измерениям профилограмм обечаек осуществлять сборку с минимальными отклонениями контуров соседних обечаек. Существует несколько вариантов компьютерного перебора собираемых обечаек. В соответствии с алгоритмом программы [3] набор маркированных обечаек ранжируют по периметру. Затем ближайшие в ранжированном ряде обечайки объединяют в секции, после чего виртуально одну обечайку (рис. 1, а) поворачивают относительно другой с заданным шагом (рис. 1, б). При каждом повороте вычисляется сумма абсолютных разностей между текущими диаметрами во всех угловых координатах. Эта операция повторяется столько раз, сколько измерений было выполнено в сечении. Далее из всех сумм абсолютных разностей выбирается сумма с минимальным значением. Так, например, на рис. 1, в изображен вариант взаимного распо-

ложения двух обечаек с минимальной суммой разностей диаметров, а на рис. 1, г – с максимальной. Аналогичные операции осуществляют для других секций. Каждый раз новое значение минимальной разности сравнивают с предыдущим и запоминают меньшее. Выход из цикла осуществляют после перебора всех пар обечаек, из которых сделан аппарат, а пару обечаек, имеющую минимальную сумму разностей, выбирают для сборки. Кроме того, в зависимости от соотношения средних радиусов обечаек алгоритм может состоять из двух этапов: первый предполагает расположение обечаек в порядке уменьшения или увеличения среднего радиуса по длине корпуса. Это облегчает установку устройств внутри корпуса со стороны большого диаметра; а второй этап обеспечивает взаимное расположение стыкуемых обечаек с минимальной суммой отклонений радиус-векторов во всех угловых координатах, что обеспечивает минимальное смещение кромок. Разработанная программа учитывает ряд требований, предъяв-

ляемых ОСТ 26.291-87 к сварным соединениям обечаек. Так, увод f кромок в стыковых сварных соединениях не должен превышать $f \leq 0,1S + 3$ мм.

В предложенном алгоритме оптимизации сборки цилиндрических корпусов в качестве исходной информации использованы текущие радиус-вектора и радиус средней окружности. Поскольку при производстве обечаек методом гибки из листового материала отклонения от правильной цилиндрической формы по форме поперечного сечения, а форма продольного соответствует требованиям. Кроме того, часто при сборке из обечаек крупногабаритного нефтегазового оборудования возникает необходимость послеоперационного контроля формы поперечного сечения обечаек и ее регистрация для оптимального расположения деталей в готовой конструкции. Оптимальное расположение базовых деталей позволяет повысить производительность сборочных и монтажных операций, а также качество выпускаемой продукции. При изготовлении крупногабаритных обечаек на одном, а сборке готовых изделий на другом. При транспортировке детали ее разрезают на части, а затем сваривают, поэтому также возникает необходимость контроля обечайки при сварке ее частей. Регистрация формы обечаек позволяет выявлять этап технологического процесса, на котором произошло отклонение формы от заданного допуска.

Анализ методов и средств контроля обечаек

Для измерения радиуса кривизны цилиндрических деталей больших размеров разработано большое количество различных накладных приборов, которые называются приборами измерения по элементам круга [4]. Эти приборы косвенно определяют диаметр детали по результатам измерения радиуса кривизны участка цилиндрической детали. Основное преимущество таких приборов перед приборами, которые измеряют абсолютный размер, – относительно малые габариты при больших диапазонах измерения. Принцип действия накладных приборов основан на том, что один из параметров задается, а другой измеряется. Схема измерения радиуса круга его по элементам (рис. 1, а) имеет следующие параметры: L – длина хорды, H – высота сегмента, F – расстояние от вершины описанного угла до поверхности, S – длина дуги, α – угол между касательными, образующими описанный угол, β – центральный угол, со-

ответствующий точкам касания, T – расстояние от вершины описанного угла до точки касания. Принцип действия измерительных приборов определяется комбинацией пар параметров элементов круга и поэтому существует большое количество вариантов конструкций измерительных приборов [4]. Приборы с подобными схемами измерения применимы для измерения деталей с правильной цилиндрической формой, например, деталей, изготавливаемых на карусельных станках. Профилограммы деталей, изготавливаемых методом гибки из листовых заготовок, содержат гармонические составляющие, обусловленные волнистостью листовых заготовок. Из особенностей технологического процесса производства обечаек следует, что в валковой листогибочной машине поддается исправлению волнистость листового материала только с длинами волн, большими расстояния между осями валков [1–2].

Для исследования возможностей применения этого метода измерения для обечаек определим погрешность измерения, обусловленную волнистостью листовой заготовки. В качестве примера рассмотрим схему измерения (рис. 1, б) с задаваемой длиной хорды L и измеряемой высотой сегмента H . Уравнения измерения имеют следующий вид [4]:

$$D = \frac{L^2}{4H} + H; \quad H = 0,5(D - \sqrt{D^2 - L^2}). \quad (1)$$

Если наконечник измерительного устройства попадает на впадину волны величиной Δ , то измерительное устройство зарегистрирует диаметр:

$$D' = \frac{L^2}{4(H + \Delta)} + (H + \Delta) \quad (2)$$

с погрешностью:

$$\delta = \left| \frac{D' - D}{D} \right| \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Для анализа схемы измерения определим зависимость относительной погрешности от относительного размера $c = L / D$ измерительного устройства и величины волнистости Δ . На графике (рис. 1, в) представлена зависимость относительной погрешности от относительного размера устройства c при $\Delta = 12$ мм и $D = 4000$ мм. Из этой зависимости следует, что погрешность уменьшается при стремлении размера прибора к размеру детали, то есть чем больше габариты устройства, тем меньше его погрешность.

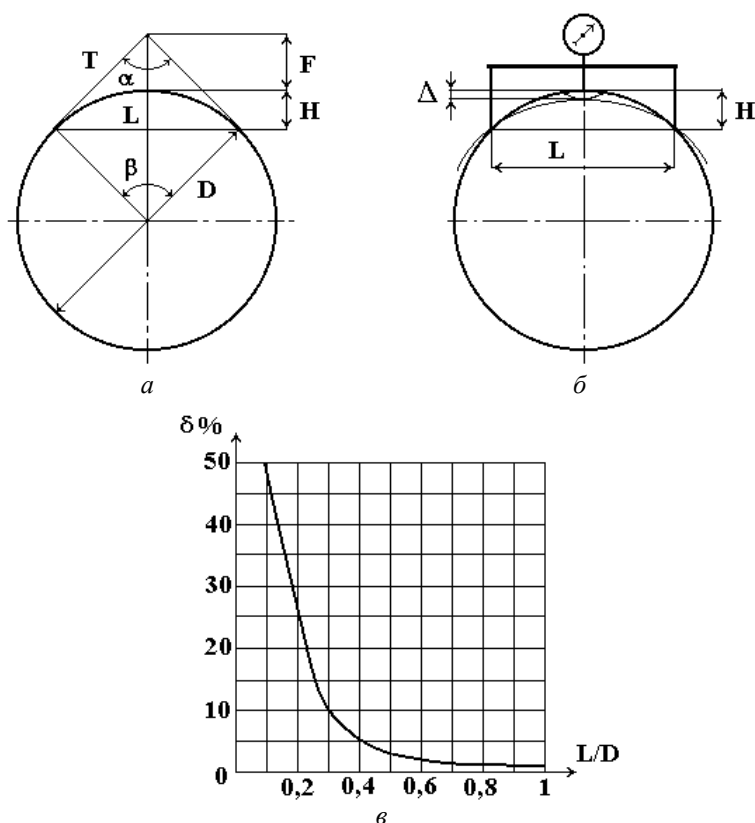


Рис. 2. Накладные приборы измерения диаметров:
 а – геометрические параметры кривизны круга; б – схема измерения; в – погрешность измерения

Для управления технологическим процессом правки обечаек необходима информация о кривизне участков профиля детали в зоне листогибных валков машины. Для измерения радиуса кривизны участков профиля обечайки зарубежная фирма «HAEUSLER», выпускающая листогибное оборудование, разработала оптический триангуляционный метод. Устройство, которое реализует этот метод, оказывает минимальное воздействие на технологический процесс. Кроме того, этот метод может быть использован для измерения геометрических параметров изделий в нагретом состоянии. Триангуляционный метод измерения является наиболее перспективным и используется при контроле геометрических параметров различных крупногабаритных изделий сложной формы, например, лопаток турбин. Однако этот метод может быть использован для контроля кривизны контура обечаек только при допустимой волнистости листовых заготовок. Для выбора схемы измерения, обеспечивающей минимальную погрешность, и получения статической характеристики измерительного устройства необходима математическая модель схемы измерения. Для моделирования геометрических пре-

образований при триангуляционном методе измерения целесообразно использовать математический аппарат теории функции комплексного переменного [5].

Для проведения аналитического исследования триангуляционного метода расположим на комплексной плоскости (рис. 3) поперечное сечение обечайки. Для упрощения математических преобразований примем допущение, что радиус кривизны R в зоне измерения является постоянным. При вращении обечайки координаты центра кривизны $\dot{B} = -b_1 + jb_2 = Be^{j\beta}$ меняют свое положение. Поскольку радиус кривизны R и координаты b_1 и b_2 могут быть определены из системы трех уравнений, то схема измерения должна содержать три оптических излучателя с угловыми координатами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и позиционно-чувствительные фотоприемники с оптикой, расположенные на луче $Ze^{j\psi}$.

Составим уравнение для лучей, которые с помощью позиционно чувствительных фотоприемников определяют положение световой метки от излучателя на поверхности детали:

$$Be^{j\beta} + R \cdot e^{j\phi} = Xe^{j\alpha}; \quad (4)$$

При составлении уравнений с комплексными коэффициентами (4) учитывалось, что угол падения на поверхность детали равен углу отражения относительно нормали к этой поверхности.

После преобразований уравнений с комплексными коэффициентами (4) с помощью формул Эйлера к системе уравнений с действительными переменными и их численного решения получены уравнения кривизны участка контура.

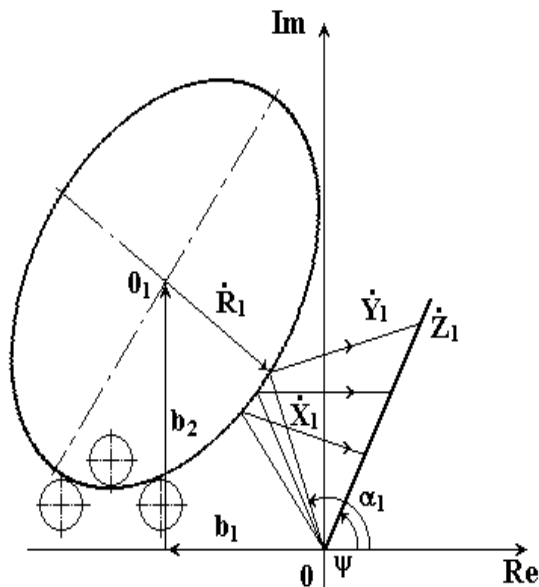


Рис. 3. Оптическая схема измерения кривизны контура обечайки

Система уравнений является нелинейной и время ее решения в управляющем компьютере, работающем в режиме реального времени, должна обеспечить необходимое быстродействие.

Триангуляционный метод измерения радиуса кривизны обечайки в процессе ее формообразования имеет следующие преимущества: сравнительно простая конструкция и малые габариты измерительного устройства.

В качестве недостатков этого метода необходимо отметить следующее:

1. Устройство осуществляет измерение кривизны деформированной обечайки, а по технологии измерения радиуса кривизны необходимо выполнять при недеформированном контуре, и поэтому практически невозможно по результатам измерения радиуса кривизны в точках контура обечайки получить информацию о форме полного контура;

2. Этот метод применим для контроля деталей с правильной цилиндрической формой.

Информация о кривизне участка профиля обечайки необходима для управления правкой обечайки, поскольку по технологии процесса формообразования радиус гибки в участке контура определяется радиусом кривизны участка в зоне валков.

Разработаны измерительные оптико-электронные устройства для измерения геометрических параметров обечаек в процессе их производства. Устройство [6] содержит двухкоординатный механизм определения центра поперечного сечения детали, состоящий из горизонтальной и вертикальной направляющих, с подвижно установленными на них датчиками определения положения касательных к контуру детали, и установленными жестко на направляющих лазерными дальномерами, а оптическая головка установлена с возможностью вращения в плоскости поперечного сечения детали на горизонтальной штанге, установленной в центр поперечного сечения детали. Недостатком этого устройства является погрешность регистрации формы детали из-за погрешности определения центра сечения детали, поскольку используемый для поиска центра детали метод прямоугольника позволяет получить высокую точность для сечения детали и с идеальной формой эллипса, реальные детали имеют отклонение от этой формы. Кроме того, это устройство имеет громоздкую конструкцию. Следующее устройство для измерения размеров обечаек [7] содержит двухкоординатный механизм определения центра поперечного сечения измеряемой детали, который состоит из двухкоординатного механизма базирования оптической головки и блока управления, содержащего промышленный контроллер, управляющий перемещением и вращением оптической головки, и сигнальный процессор, который спектральным методом определяет положение центра поперечного сечения. Недостатком этих двух устройств является громоздкость двухкоординатных конструкций, и для некоторых технологических машин сложно найти для установки этих устройств место, которое бы не усложняло операцию установки детали в технологическую машину. Из проведенного анализа следует, что разработка устройства и системы, которые бы удовлетворяли требованиям технологического процесса, довольно сложно.

Разработанное устройство

На основе проведенного анализа существующих методов и средств измерения геомет-

рических параметров был предложен метод и реализовано оптико-электронное устройство, позволяющие относительно просто решить задачу измерения диаметра и кривизны участка обечайки в холодном состоянии (рис. 3). Разработанный метод измерения кривизны контура обечайки позволяет осуществлять контроль кривизны участка профиля поперечного сечения и диаметр обечайки. Предложенный метод измерения диаметра основан на геометрическом свойстве круга, а именно диаметр представляет собой максимальное расстояние между точками окружности внутри круга. Измерительное устройство, реализующее этот метод, содержит дальномер, который закреплен на перемещающейся каретке с возможностью поворота в некотором угловом диапазоне и осуществляет сканирование противоположного участка внутренней поверхности детали; результаты измерения расстояний запоминаются в блоке управления, и из измеренных результатов выбирается максимальное значение, которое и является диаметром в данном продольном сечении.

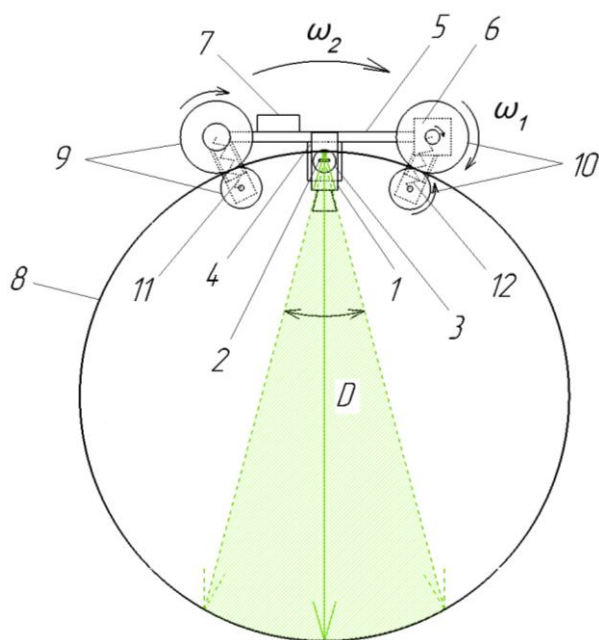


Рис. 4. Схема оптико-электронного устройства для измерения размеров обечайки

Оптико-электронное устройство для измерения размеров обечайки содержит оптическую головку 1, представляющую собой сканирующий оптический дальномер 2, который установлен на приводе вращения 3 и серводвигателем 4. Привод вращения дальномера 3 выполнен с возможностью углового сканирования противоположного внутреннего участка обечайки.

Привод вращения 3 закреплен на каретке перемещения 5 по контуру обечайки с помощью серводвигателя 6. На каретке перемещения 5 установлен также блок управления 7, к входу которого подключен информационный выход оптического дальномера 2, а управляющие выходы блока управления 7 соединены с серводвигателем 4 привода вращения 3 и серводвигателем 6 каретки перемещения 5 и оптическим дальномером 2. Механизм каретки 5 выполнен с возможностью перемещения по контуру обечайки 8 с помощью двух пар роликов 9 и 10, каждая пара которых содержит по прижимной пружине 11 и 12, а один ролик 10 механически соединен с серводвигателем 6, образуя привод перемещения.

Устройство работает следующим образом. Перед началом измерения каретка перемещения 5 устанавливается на обечайку 8, затем блок управления 7 включает дальномер 2 и угловое сканирование с помощью привода 3 противоположного внутреннего участка обечайки 8 в некотором диапазоне. Несколько результатов измерения расстояний между точками противоположных участков внутренней поверхности обечайки регистрируются в блоке управления 7. Поскольку максимальное расстояние между точками круга равно диаметру, то блок управления 7 из массива результатов выбирает максимальное значение, которое равно диаметру обечайки. Далее блок управления 7 отключает режим сканирования и дальномер 2 включает механизм перемещения 5, каретка устанавливается в новой координате контура профиля, затем процесс измерения диаметра повторяется. После измерения диаметров во всех точках контура с помощью блока управления строится профилограмма поперечного сечения детали, то есть регистрация формы.

Выводы

Разработанное измерительное устройство реализует прямой метод измерения диаметра обечайки по принципу штангенциркуля и имеет сравнительно простую конструкцию и малые габариты. Единственный элемент измерительного устройства, который определяет его точность – лазерный дальномер с инструментальной погрешностью 1 мм. Это значение погрешности укладывается в допуск на диаметр обечайки 1 %. Необходимо отметить, что разработанное измерительное устройство является инвариантным, поскольку параметры схемы измерения не оказывают влияние на точность

измерения. Это устройство может найти применение в технологических процессах сборки и монтажа крупногабаритного оборудования в различных отраслях промышленности при производстве энергетического и нефтегазового оборудования, аэрокосмической техники, в железнодорожном транспорте и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлинер, Ю. И. Технология химического и нефтяного аппаратостроения / Ю. И. Берлинер, Ю. А. Балашов. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.
2. Никифоров, А. Д. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А. Д. Никифоров. – М.: Высшая школа, 2000. – 510 с.

3. Шилин, А. Н. Автоматизация определения оптимальных условий сборки корпусов нефтегазового оборудования / А. Н. Шилин, С. А. Петров, В. П. Заярный // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 6. – С. 10–14.

4. Рубинов, А. Д. Контроль больших размеров в машиностроении / А. Д. Рубинов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 120 с.

5. Шилин, А. Н. Моделирование геометрических преобразований при оптических измерениях профиля деталей / А. Н. Шилин // Изв. вузов. Приборостроение. – 1999. – 42, N 5–6. – С. 44–47.

6. П. м. 159150 РФ, МПК G01B11/00. Оптико-электронное устройство для измерения размеров обечаек / Д. Г. Сницарук, А. Н. Шилин; ВолгГТУ. – 2016.

7. Пат. 2654957 Российская Федерация, МПК G01B11/08, G01B21/10 Оптико-электронное устройство для измерения размеров обечаек / Д. Г. Сницарук, А. Н. Шилин; ВолгГТУ. – 2018.

УДК 004.896

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-31-36

*И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Т. В. Скребцова
А. С. Шалагинов, В. Н. Симонов*

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ И АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЙРОСЕТЕЙ

Ставропольский государственный аграрный университет

vorotn_in@mail.ru, mma_26@inbox.ru, tvs3657@mail.ru, shalaginov.andrey@gmail.com
simonovvn@gmail.com

Автор, ответственный за переписку:

Андрей Сергеевич Шалагинов, shalaginov.andrey@gmail.com

Автоматическое обнаружение неисправностей является важной технологией повышения энергоэффективности отраслей и производств агропромышленного комплекса (АПК). Методы диагностики развивались вместе с развитием аппаратных и программных средств от обнаружения самого факта аварии, как правило, с сопутствующим выходом оборудования из строя, до предиктивного анализа состояния электрооборудования, позволяющего избегать аварийных ситуаций, прогнозировать остаточный ресурс, своевременно проводить мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту, вводу в эксплуатацию резерва. В настоящий момент, по причине удешевления стоимости вычислительных мощностей, начинается массовое внедрение нейронных сетей в системы диагностики. Одновременная миниатюризация электроники позволяет реализовывать компактные встраиваемые системы. Тем не менее, применение нейронных сетей имеет свои особенности.

В рамках данной статьи рассматривается прикладная задача определения требований, которым должна соответствовать информационно-измерительная система (ИИС) для возможности использования нейронной сети и разработка обобщенной структурной схемы ИИС, соответствующей этим требованиям. Целью данной научной статьи является подтверждение соответствия разработанной структурной схемы предъявленным требованиям и работоспособности ИИС, выполненной в соответствии со структурной схемой. Для этого была создана аппаратная реализация ИИС и исследована ее работа со стендовым трехфазным асинхронным двигателем.

Ключевые слова: нейронная сеть, информационно-измерительная система, диагностика, структурная схема

I. N. Vorotnikov, M. A. Mastepanenko, T. V. Skrebtsova, A. S. Shalaginov, V. N. Simonov

**FEATURES OF THE CHOICE OF STRUCTURE AND HARDWARE IMPLEMENTATION
OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF FAULTS
OF ELECTRICAL TECHNOLOGICAL EQUIPMENT WHEN USING NEURAL NETWORKS**

Stavropol State Agrarian University

Automatic fault detection is an important technology for improving energy efficiency in the agro-industrial complex (AIC) industries and production facilities. Diagnostic methods have evolved along with hardware and software development, from detecting the very fact of an accident, usually with the accompanying equipment failure, to predictive analysis of the electrical equipment condition, allowing to avoid emergency situations, predict the remaining resource, timely carry out maintenance and repair activities, and commission a reserve. Currently, due to the reduction in the cost of computing power, the mass introduction of neural networks into diagnostic systems is beginning. Simultaneous miniaturization of electronics allows implementing compact embedded systems. However, the use of neural networks has its own characteristics. This article considers the applied problem of determining the requirements that an information and measuring system (IMS) must meet to be able to use a neural network, and the development of a generalized structural diagram of an IMS that meets these requirements. The purpose of this scientific article is to confirm the compliance of the developed structural diagram with the requirements and the operability of the IMS, made in accordance with the structural diagram. For this purpose, a hardware implementation of the IMS was created and its operation with a bench three-phase asynchronous motor was investigated.

Keywords: neural network, information-measuring system, diagnostics, structural diagram

В настоящее время актуальность систем, которые могут автоматически обеспечивать раннее обнаружение аномальной работы оборудования, только возросла. Причиной этого является сокращение числа квалифицированных специалистов в последние годы [1] и увеличение числа устаревших объектов АПК [2].

Существуют различные методы предиктивной диагностики, каждый со своими достоинствами и недостатками, требующими оценки для конкретной задачи. В [3] показано, что с развитием аппаратно-программных средств, их миниатюризацией и удешевлением, перспективу широкого внедрения в АПК получили методы раннего обнаружения аномальной работы электротехнологического оборудования, основанные на использовании нейронных сетей. В общем случае, нейронные сети могут использоваться для анализа различных классов диагностических данных, собираемых с электрооборудования, таких как вибрация, температура, акустические шумы, электромагнитная эмиссия, токи и напряжение цепей питания. Для электрооборудования предпочтительными являются методы, использующие анализ сигналов напряжения и потребляемого тока, так как они позволяют организовать удаленный мониторинг без непосредственного доступа к электрооборудованию и способны выявить широкий спектр неисправностей.

Для обучения нейронных сетей могут применяться различные алгоритмы [4]. В идеальном случае для обучения нейронной сети необходимо использовать весь спектр как нормальных, так и аномальных данных о работе оборудования. Однако возможные типы аномальных

данных, соответствующих тем или иным неисправностям, очень разнообразны. Чтобы их получить, фактически необходимо преднамеренно воспроизвести все детектируемые неисправности, выводя электрооборудование из строя. Как следствие, получение набора аномальных данных является дорогостоящим. Кроме того, всегда остается класс редких или трудновоспроизводимых неисправностей, не попадающих в набор аномальных данных, что делает этот набор заведомо неполным. Поэтому часто для обучения нейронной сети используются только нормальные данные, полученные с исправного оборудования, а задача диагностики ставится как обнаружение неизвестных аномальных данных, которые ранее не наблюдались в обучающих данных.

Таким образом, для обучения нейронной сети требуется, как минимум, набор данных нормальных и аварийных режимов. Для некоторых задач уже получены и публично доступны обучающие наборы данных. Например, в рамках конкурсов, проводимых сообществом DCASE – Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (URL: <https://dcase.community/>) выпущены наборы обучающих аудиоданных для нескольких типов устройств, таких как вентилятор, насос и другие. Некоторые из производителей промышленного оборудования начали работу по формированию наборов данных для выпускаемых ими устройств. Однако в настоящий момент перечень устройств, для которых имеются готовые наборы нормальных данных для обучения нейронной сети, очень ограничен. Это делает актуальной задачу создания информационно-измерительной системы (ИИС), позволя-

ющей получить обучающие наборы данных для диагностируемого оборудования.

В рамках проводимого исследования был сформирован ряд требований к такой ИИС:

- ИИС должна выполнять как функции первоначального получения данных для обучения нейронной сети, так и функции диагностики неисправностей после обучения нейронной сети, без изменения аппаратной реализации;

- программно-аппаратная реализация ИИС должна быть достаточной как для использования классических методов спектрального анализа сигналов тока и напряжения, базирующихся на построении спектральной модели на основе быстрого преобразования Фурье, так и методов, использующих нейронные сети;

- так как асинхронные двигатели и электро-

технологическое оборудование АПК в большинстве случаев питаются от трехфазной электрической сети, ИИС должна иметь не менее трех каналов измерения напряжения и трех каналов измерения тока;

- измерительные каналы ИИС должны иметь характеристики, достаточные для измерения как нормальных, так и аномальных входных сигналов, получаемых от диагностируемого оборудования;

- измерительные каналы ИИС должны с минимальными затратами модифицироваться для различных уровней питающих напряжений оборудования и потребляемых оборудованием токов.

С учетом вышеперечисленных требований были разработаны и исследованы два варианта структурных схем ИИС (рис. 1).

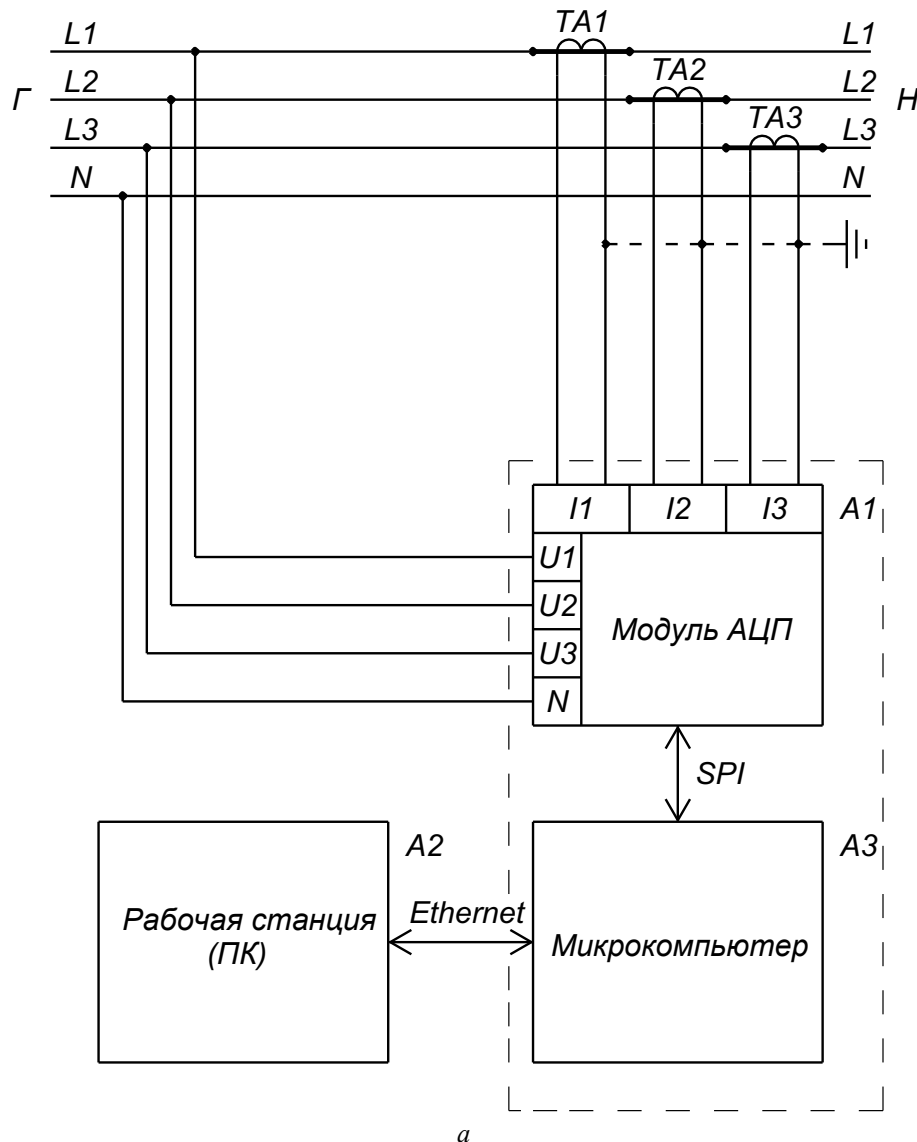


Рис. 1. Структурная схема ИИС (см. также с. 34)

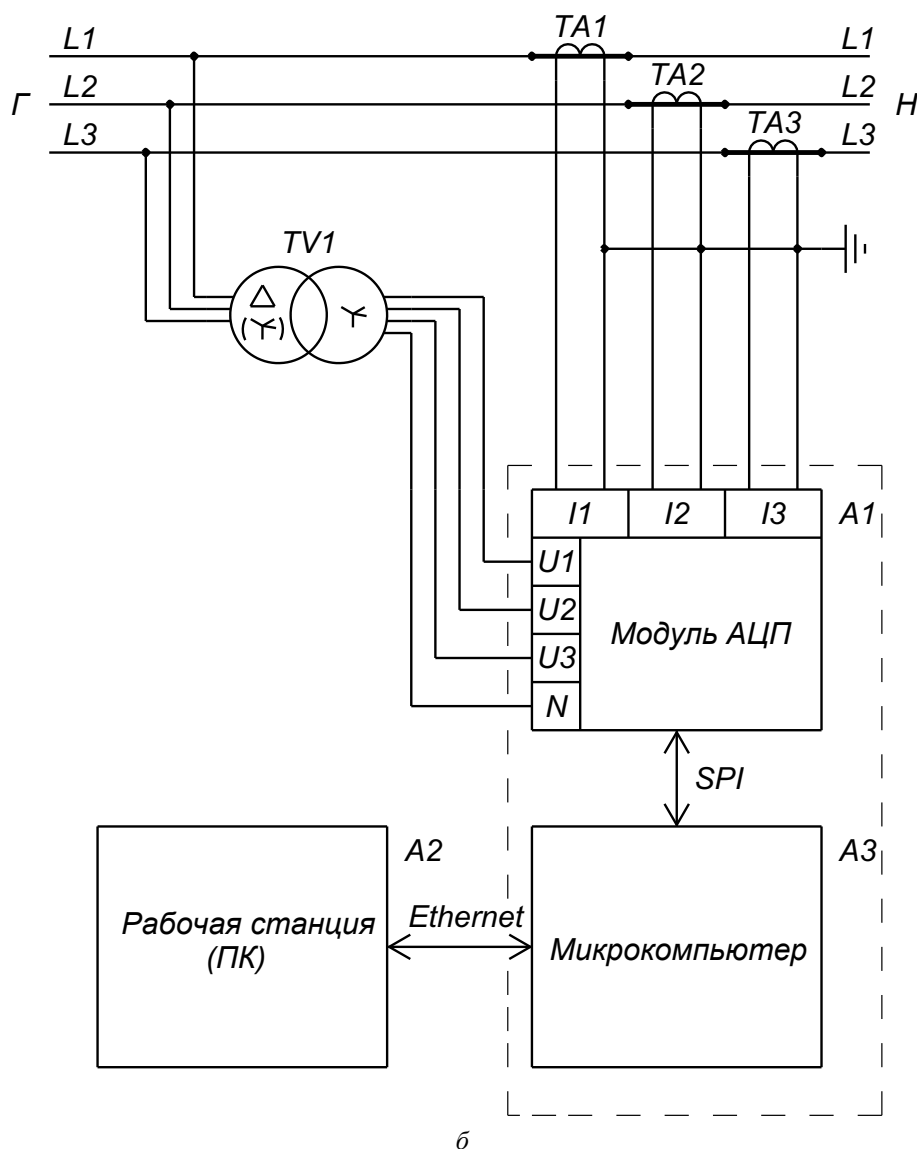


Рис. 1. Окончание

Вариант схемы на рис. 1, а предназначен для оборудования, питающегося от электрической сети 0,4 кВ, и имеет непосредственное включение измерительных цепей напряжения. Вариант схемы на рис. 1, б предназначен для оборудования, питающегося от электрической сети свыше 0,4 кВ, и отличается наличием дополнительного измерительного трансформатора напряжения *TV1*. В остальном схемы идентичны. Принцип работы ИИС следующий: сигналы тока с датчиков тока, в качестве которых используются трансформаторы тока *TA1-TA3*, и сигналы напряжения (непосредственно от линии питания или через измерительный трансформатор напряжения *TV1*) поступают на измерительные входы каналов тока *I1-I3* и каналов напряжения *U1-U3* модуля аналого-цифрового

преобразователя (АЦП) *A1*. Оцифрованные значения сигналов по высокоскоростному интерфейсу *SPI* передаются в микрокомпьютер *A3*. Микрокомпьютер служит программно-аппаратной платформой как для реализации классических методов диагностики, так и методов, использующих нейронные сети. При этом, для сокращения требований к ресурсам микрокомпьютера, в его памяти размещается только программное обеспечение уже предварительно обученной нейронной сети. В режиме накопления данных для обучения, микрокомпьютер ретранслирует данные от модуля АЦП по интерфейсу *Ethernet* на рабочую станцию *A2*. Рабочая станция в режиме обучения используется для инициализации весовых коэффициентов нейронной сети и ее обучения. В режиме диаг-

ности рабочая станция выполняет функции автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора. В общем случае в режиме диагностики микрокомпьютер и модуль АЦП с датчиками тока и напряжения являются независимой частью ИИС и могут функционировать без рабочей станции. Одна рабочая станция может быть соединена по сети с несколькими микрокомпьютерами и обслуживать одновременно группу устройств.

В рамках проводимого исследования была реализована ИИС, соответствующая схеме на рис. 1, а. Основой модуля АЦП выбрана высокоинтегрированная микросхема *SoC (System-on-a-Chip*, система на кристалле) *SAM4CMP*, выполненная на базе двухъядерного процессора *ARM® Cortex-M4* с функциями цифровой обработки сигналов и дополнительным метрологическим модулем для многофазных приборов учета. Микросхема предназначена для измерений в трехфазных электросетях, имеет три измерительных канала напряжения и четыре измерительных канала тока с динамическим диапазоном 3000:1. Измерительные каналы тока могут подключаться непосредственно к датчикам тока различных типов: шунт, трансформатор тока, катушка Роговского. В данной реализации ИИС были использованы трансформаторы тока с разъемным сердечником, что позволяет подключаться к уже установленному оборудованию без разрыва цепей питания. Микросхема обеспечивает высокую точность и стабильность измерений в промышленном диапазоне температур. В качестве микрокомпьютера *A3* был выбран одноплатный микрокомпьютер *Raspberry Pi 4B*. Он имеет вычислительные ресурсы и набор интерфейсов, достаточные для решения поставленной задачи, при относительно невысокой стоимости. Благодаря широкому распространению, для него доступно большое количество технической информации и обучающих материалов. Имеются модификации в промышленном исполнении. Модуль АЦП и микрокомпьютер для удобства применения были размещены в едином корпусе, предназначенном для установки на стандартную *DIN*-рейку. В этом же корпусе был размещен источник питания, питание осуществляется от измеряемой сети 0,4 кВ. Для подключения цепей тока и напряжения предусмотрены соединители.

Внешний вид разработанного устройства показан на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид устройства

В качестве рабочей станции *A2* использован персональный компьютер под управлением операционной системы *Windows 10*. Для микрокомпьютера разработано программное обеспечение (ПО), которое опрашивает модуль АЦП и передает измеренные значения токов и напряжений на рабочую станцию. Для рабочей станции разработано ПО, принимающее измеренные значения токов и напряжений и сохраняющее его в файл формата *CSV*. *CSV* – текстовый формат, предназначенный для представления табличных данных. Данный формат был выбран, так как он поддерживается практически всеми электронными таблицами, импорт и экспорт файлов формата *CSV* возможен во многих инженерных пакетах.

ИИС опробована совместно с лабораторным комплектом ЭОЭЗ-С-Р, включающим в себя трехфазный асинхронный двигатель. Измеренные значения напряжений и токов в цепях питания асинхронного двигателя успешно сохраняются в файл на рабочей станции.

Вывод

На данном этапе исследования представленных структур аппаратной реализации информационно-измерительной системы диагностики неисправностей электротехнологического оборудования произведена оценка неопределенности результатов измерений по ГОСТ 34100.3-2017. Диапазон значения неопределенности не превышает 1 % от значений результатов измерений по эталонным приборам, что вполне приемлемо для дальнейшего совершенствования и детализации предложенных решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чечель, Ф. И. Кадровая проблема на предприятиях АПК, повышение привлекательности на рынке труда / Ф. И. Чечель // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2024. – № 9–1. – С. 151–156.

2. Алексеева, Н. А. Проблемы обновления основных средств объектов АПК / Н. А. Алексеева // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». – 2020. – Т. 30, № 6. – С. 781–786.

3. Мастепаненко, М. А. Перспективы нейросетевых алгоритмов в раннем обнаружении неисправностей электрооборудования агропромышленного комплекса / М. А. Мастепаненко, А. С. Шалагинов, И. Н. Воротников // Цифровая трансформация в энергетике. Вып. V [Электронный ресурс]: материалы Пятой Международной научной конференции / отв. ред. Д. Ю. Муромцев; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – 2023. – С. 105–107.

4. Николенко, С. И. Глубокое обучение / С. И. Николенко, А. А. Кадурин, Е. О. Архангельская. – СПб.: Питер, 2023. – 408 с.

УДК 621.315.175

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-36-39

А. В. Стрижиченко, В. Д. Лозовой

**СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СТРЕЛ ПРОВЕСА
И ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ**

Волжский филиал НИУ «МЭИ»

Strizhichenko@vfmei.ru, vladim.lozovoi@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку:

Александр Васильевич Стрижиченко, Strizhichenko@vfmei.ru

Воздушные линии электропередачи являются очень важной составляющей в процессе передачи электроэнергии из одной точки в другую. В силу условий, в которых осуществляется эксплуатация, они подвержены различным воздействиям извне, что в итоге может приводить к аварийным режимам работы. Одним из способов снижения аварийности является применение систем мониторинга, которые, однако, выполняют более узкую задачу – мониторинг стрел провеса или гололедообразования. Помимо этого, далеко не всегда выбирается надежный способ передачи данных на автоматизированное рабочее место диспетчера, так как для нормальной работы системы мониторинга стабильная связь должна поддерживаться на протяжении всего времени работы ЛЭП, в то время как, например, использование GSM-модемов не может гарантировать вышесказанное.

Целью данного исследования является разработка автономной и multifunctionальной системы мониторинга стрел провеса и гололедообразования.

Ключевые слова: система мониторинга, стрела провеса, гололедообразование, воздушная линия электропередачи

A. V. Strizhichenko, V. D. Lozovoy

**MONITORING SYSTEM FOR SAGGING AND ICING
ON OVERHEAD POWER LINES**

Volzhskiy branch of the NRU «MPEI»

Overhead power lines are a very important component in the process of transmitting electricity from one point to another. Due to the conditions under which they are operated, they are exposed to various external influences, which can ultimately lead to emergency operating modes. One way to reduce accidents is to use monitoring systems, which, however, perform a narrower task — monitoring the sag or icing. In addition, a reliable method of transmitting data to the dispatcher's automated workplace is not always chosen, since for the normal operation of the monitoring system, stable communication must be maintained throughout the entire operation of the power line, while, for example, the use of GSM modems cannot guarantee the above.

The purpose of this research is to develop an autonomous and multifunctional monitoring system for sagging and icing.

Keywords: monitoring system, sag, icing, overhead power line

За основу рассматриваемой далее системы мониторинга было принято уже разработанное и зарегистрированное техническое решение [7]. Оно представляет из себя систему мониторинга гололедообразования, разделенную на две

части: 1) блок связи и передачи информации; 2) датчик(и).

Блок связи и передачи информации располагается на опоре ВЛ, а датчик – на проводе. Датчик передает данные через модуль ближней

радиосвязи в микропроцессорный управляющий модуль, а затем через модуль связи стандарта GSM осуществляется передача на АРМ.

Данная разработка имеет серьезную недоработку в своей конструкции, а точнее – использование GSM. Этот способ применяется в черте города, однако является очень нестабильным, так как зависит от расположения базовых стан-

ций оператора, с которым был заключен договор. Также организация связи таким способом лишает возможности установки системы мониторинга в отдаленных от городов районах.

С учетом указанных выше недочетов предлагается система мониторинга гололедообразования и стрел провеса на ВЛ, представленная на рис. 1.

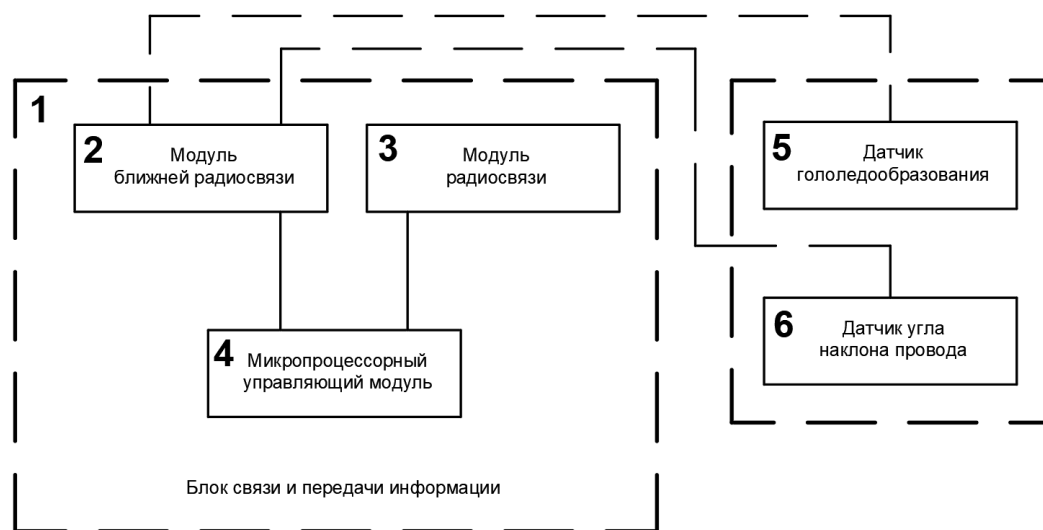


Рис. 1. Структурная схема системы мониторинга стрелы провеса и гололедообразования

1. Описание конструкции

Схема системы мониторинга стрелы провеса и гололедообразования состоит из датчиков гололедообразования и угла наклона провода, микропроцессорного управляющего модуля и модуля радиосвязи.

2. Описание работы

Датчик угла наклона провода (6) представляет из себя МЭМС-гироскоп [8], совмещенный с акселерометром [6]. Для получения данных о стреле провеса провода, эти устройства собирают информацию по угловой скорости и времени поворота. На основе этих данных рассчитывается угол поворота, он же угол наклона провода.

Датчик гололедообразования (5) производит измерения толщины стенки гололеда путем отслеживания скорости заряда воспринимающего конденсатора, емкость которого зависит от наличия ледяных отложений. Обкладки этого конденсатора присоединены к проводникам, закрепленным на проводе. При гололедообразовании время заряда увеличивается за счет наличия ледяных отложений между проводниками. Когда время заряда превышает задаваемую уставку, формируется сигнал, предупреждаю-

щий диспетчера о необходимости плавки гололеда на определенном участке сети.

Блок связи и передачи информации 1 крепится на опоре ЛЭП. Между собой датчики 5, 6 и блок 1 взаимодействуют посредством канала ближней радиосвязи. В качестве такого способа связи между устройствами может использоваться BluetoothLowEnergy [5]. После обработки получаемых данных микропроцессорным управляющим модулем 4, они отправляются на автоматизированное рабочее место диспетчера через модуль радиосвязи 3 [9], который также является ретранслятором для предыдущих участков линии, что обеспечивает возможность установки такой системы повсеместно.

Под микропроцессорным управляющим модулем понимается сложное микропроцессорное устройство, которые выполняет такие функции как прием данных от имеющихся датчиков, расчет стрелы провеса, общий контроль работы системы мониторинга, передача актуальных данных на автоматизированное рабочее место диспетчера.

Питание системы мониторинга осуществляется за счет явления электромагнитной индукции.

Также расчет стрелы провеса данной системы мониторинга можно дополнить коэффициентом, который будет учитывать старение линии, так как в процессе эксплуатации технические показатели провода снижаются и, соответственно, изменяются его допустимые режимы работы.

Описанная выше система не предполагает учет такого коэффициента, что означает ее работу на новой линии, показатели которой соответствуют указанным изготовителем, что может приводить к ошибочной работе, а точнее несвоевременному предупреждению диспетчера о недопустимой стреле провеса.

3. Установка системы мониторинга

Установка предлагаемой системы мониторинга может осуществляться в разных точках линии, так как это регулируется эксплуатирующей организацией, однако наиболее благоприятным местом установки будет являться точка, расположенная ближе к опоре, где угол наклона провода более выражен. Такой точкой может быть середина четверти от всей длины пролета (рис. 2).

Установка системы мониторинга именно в этой точке позволит более точно отслеживать изменение угла наклона провода, так как в данном случае больше всего проявляются эффекты от натяжения и нагрузки.

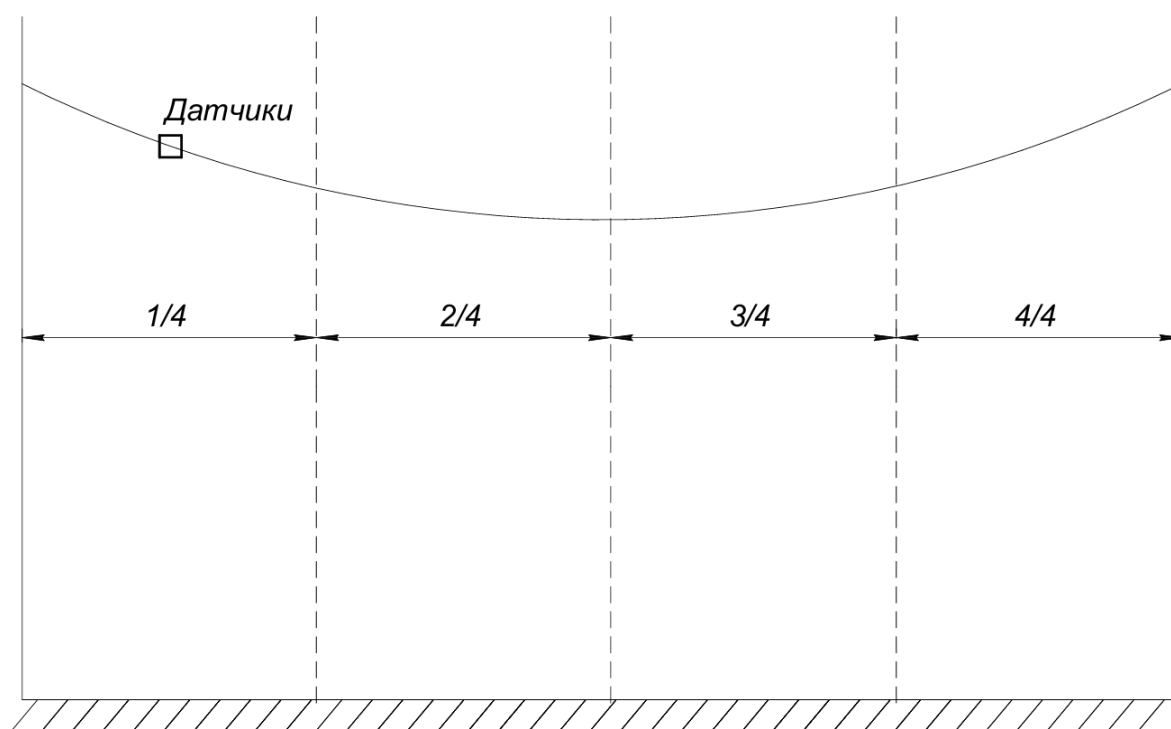


Рис. 2. Место установки датчиков системы мониторинга

Для точного выбора такой точки в конкретном пролете необходимо произвести ряд расчетов, по результатам которых будет выявлена точка с наибольшим изменением угла наклона.

Угол наклона может быть рассчитан по формуле[1]:

$$\beta_k = \arctg \left(\frac{z_{Kk} - z_{Hk}}{\sqrt{(x_{Kk} - x_{Hk})^2 + (y_{Kk} - y_{Hk})^2}} \right), \quad (1)$$

где x_{Hk}, y_{Hk}, z_{Hk} – координаты начала k -го проводника; x_{Kk}, y_{Kk}, z_{Kk} – координаты конца k -го проводника.

Организация связи на АРМ

На автоматизированном рабочем месте диспетчера должна быть установлена принимаю-

щая радиостанция, а также микропроцессорное устройство, которое будем принимать и идентифицировать входящую информацию, для ее дальнейшего вывода на экран монитора.

Для графического отображения можно использовать готовое программное обеспечение от АО «ЮГ-СИСТЕМА ПЛЮС». Также эта организация занимается многофункциональными микропроцессорными устройствами.

Выводы

Внеся корректировки и дополнив уже существующую систему мониторинга, получаем полностью автономную, универсальную и мно-

гофункциональную систему мониторинга стрел провеса и гололедообразования, благодаря которой персонал сможет принимать своевременные решения для сохранения нормального рабочего режима ВЛ.

Для контроля воздушной линии электропередачи данную систему рекомендуется устанавливать на каждом пролете, однако не исключена возможность установки в конкретных пролетах, которые определяет для себя организация, осуществляющая эксплуатацию линии. Также данная система может устанавливаться на каждой фазе в пролете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белицын, И. В. Алгоритм расчета электрического поля ВЛЭП на основе метода эквивалентных зарядов / И. В. Белицын, А. В. Макаров // Ползуновский вестник, 2007. – № 4. – Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-rascheta-elektricheskogo-polya-vlep-na-osnove-metoda-ekvivalentnyh-zaryadov> (дата обращения: 08.05.2025 г.).
2. Дементьев, С. С. Интеллектуальная система мониторинга гололедообразования на воздушных линиях электропередачи 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических

наук / С. С. Дементьев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – 142 с.

3. Бадалян, Н. П. Кабельные и воздушные линии электропередачи: учеб. пособие / Н. П. Бадалян, Г. П. Колесник, Д. П. Андрианов, Ю. С. Чебрякова; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. – 260 с.

4. Классификация акселерометров и сферы применения: ИНЕЛСО, 2023. – Режим доступа: URL: <https://inelso.ru/library/statyi/klassifikatsiya-akselerometrov-i-sfery-primeneniya/> (дата обращения: 14.04.2025 г.).

5. Летфуллин, И. Р. Стандарты и технологии беспроводных сетей связи ближнего радиуса действия / И. Р. Летфуллин // Труды МАИ, 2022. – № 124. – DOI: 10.34759/trd-2022-124-14 (дата обращения: 14.04.2025 г.).

6. Новые технологии беспроводной передачи данных: Н. Жиленков, СТА, 2003. – Режим доступа: URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/oborudovanie/modemy/125293/> (дата обращения: 14.04.2025 г.).

7. Рукавицын, А. А. Устройство определения наличия и толщины ледяных отложений на проводах воздушной линии электропередачи / А. А. Рукавицын, А. В. Феоктистов, А. А. Кучерявенков. – Режим доступа: URL: https://searchplatform.rospatent.gov.ru/doc/RU2754773C1_20210907 (дата обращения: 14.04.2025 г.).

8. Технологии, виды и применения гироскопов: ИНЕЛСО, 2023. – Режим доступа: URL: <https://inelso.ru/library/statyi/tekhnologii-vidy-i-primeneniya-giroskopov/> (дата обращения: 14.04.2025 г.).

9. Макаренко, А. А. Устройства приема и преобразования сигналов: учеб. пособие / А. А. Макаренко, М. Ю. Плотников; Университет ИТМО, 2019. – 112 с.

УДК 621.317.322

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-39-43

А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВУХПОЛЮСНИКА В МНОГОПОЛЮСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Волгоградский государственный технический университет

nefediev@rambler.ru, turboacs@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

В статье представлено описание разработанного микропроцессорного измерительного прибора для измерения модуля и составляющих как отдельного комплексного сопротивления двухполюсника, так и двухполюсника, расположенного в одной из ветвей многополюсной электрической цепи типа Т с одной недоступной для подключения точкой, а также в ветви многополюсной электрической цепи типа Н с двумя недоступными для подключения точками. Приведена структурная схема микропроцессорного измерительного прибора и результаты его исследования.

Ключевые слова: микропроцессорный измерительный прибор, комплексное сопротивление двухполюсника, многополюсная электрическая цепь, метод измерения, микропроцессорный блок управления

A. I. Nefed'ev, G. I. Sharonov

MEASUREMENT THE COMPLEX RESISTANCE PARAMETERS OF A TWO-TERMINAL IN A MULTI-TERMINAL ELECTRIC CIRCUIT

Volgograd State Technical University

A microprocessor measuring unit for measuring the module and components of both a separate complex resistance of a two-terminal network and a two-terminal network located in one of the branches of a multi-terminal electric circuit of type T, with one point inaccessible for connection, and in a branch of a multi-terminal electric circuit of type H, with two points inaccessible for connection has been developed. A structural diagram of the microprocessor measuring unit and the results of its study are presented.

Keywords: microprocessor-based measurement unit, complex resistance of two-terminal element, multi-pole electrical circuit, method of measurement, microprocessor control unit

Определение характеристик комплексного сопротивления двухполюсника (КСД) требует минимизации влияния окружающих компонентов схемы, находящихся в смежных участках тестируемой и эталонной многополюсной электрической цепи (МЭЦ), а также цепей обработки сигнала. КСД может быть элементом МЭЦ типа Т, где подключение затруднено из-за одной недоступной точки, или МЭЦ типа Н, с двумя такими точками. Для моделирования КСД используют параллельные, последовательные и смешанные двух-, трех- и четырехэлементные схемы.

Алгоритмические методы измерений часто используются для повышения точности определения параметров отдельных КСД [1–4].

С целью повышения точности измерения модуля и составляющих комплексного сопротивления двухполюсника в цепи переменного тока был разработан микропроцессорный измерительный прибор. Измеряемый двухполюсник расположен в одной из ветвей МЭЦ типа Н. Устройство способно измерять сопротивление на постоянном токе в широком диапазоне – от сотых долей ома до тысяч мегаом [5].

Разработанный прибор обеспечивает прямое и дистанционное измерение (с использова-

нием двух экранированных двухпроводных линий для подключения тестируемой МЭЦ). При этом происходит двух- или многотактное изменение конфигурации измерительной цепи без разрыва тестируемой и эталонной МЭЦ. Это позволяет получить значения модуля и составляющих комплексного сопротивления, необходимые для определения параметров КСД в ветви измерительной многополюсной цепи (ИМЭЦ) с двумя недоступными точками, независимо от характеристик измерительной цепи и тракта обработки сигнала.

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного прибора, включающая источник сигнала (ИС), первый двухпозиционный ключ (К1), ИМЭЦ с исследуемым двухполюсником Z_x образцовой многополюсной измерительной цепи (ОМЭЦ) с эталонным двухполюсником Z_0 , первый преобразователь «ток-цифра» (ПТЦ1), второй преобразователь «ток-цифра» (ПТЦ2), второй двухпозиционный ключ (К2), блок управления (БУ), первый экран (Э1), соединенный с первым выходом ИС (а), второй экран (Э2), соединенный со вторым выходом ИС (b), а также микропроцессорный блок управления (МБУ).

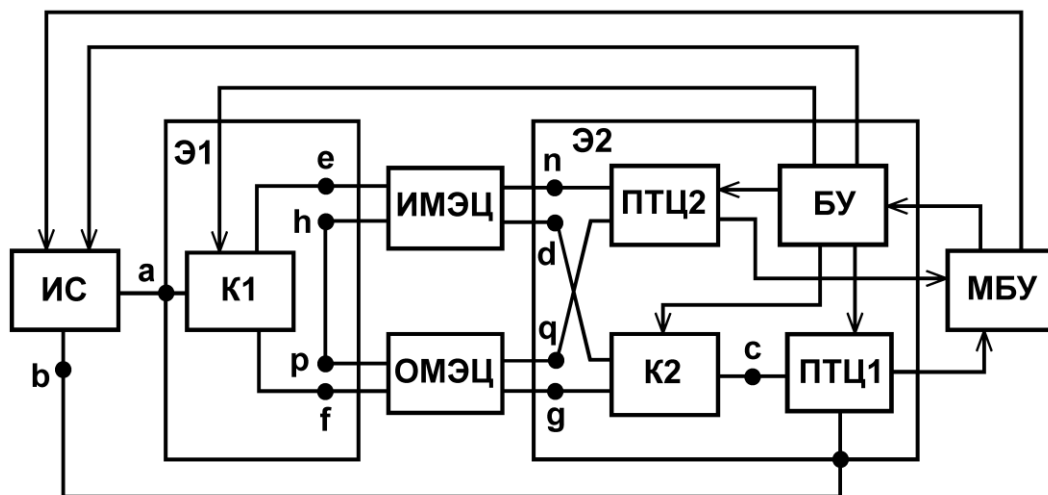


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорного измерительного прибора

На рис. 2 приведены схемы замещения исследуемого КСД Z_x (рис. 2, а) и образцового КСД Z_0 (рис. 2, б), расположенных соответственно в измерительной и образцовой МЭЦ. Схемы замещения содержат измеряемое комплексное сопротивление двухполюсника Z_x , образцовое комплексное сопротивление двухполюсника Z_0 , однородное одной из составляющих исследуемого комплексного сопротивле-

ния двухполюсника, комплексные сопротивления двухполюсников $Z_x, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8$ эквивалентные, например, сопротивлениям подводящих проводов и контактов ключей.

Наличие экранов Э1 и Э2 позволило исключить влияние на результат измерения сопротивлений зажимов e, h, p, f для подключения измерительной МЭЦ и образцовой МЭЦ относительно экрана Э1 и комплексных сопротив-

лений зажимов n, d, q, g для подключения измерительной и образцовой МЭЦ относительно экрана Э2, так как потенциалы данных групп

зажимов эквивалентны потенциалам соответствующих экранов, а комплексное сопротивление между экранами подключено параллельно ИС.

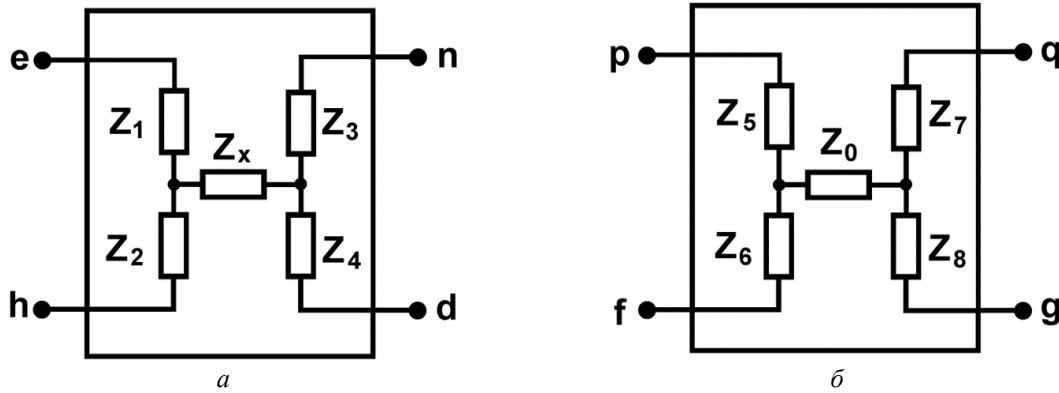


Рис. 2. Схемы замещения измерительной (а) и образцовой (б) многополюсной электрической цепи типа Н

Такое построение измерительного прибора также позволило исключить влияние значений параметров $Z_{ис}$, $Z_{птц1}$, $Z_{птц2}$ элементов измерительного прибора на результат измерения, которые эквивалентны внутреннему комплексному сопротивлению ИС и входным комплексным сопротивлениям ПТЦ1 и ПТЦ2.

Выражения для токов через преобразователи токов ПТЦ1 и ПТЦ2 с пассивным делителем тока запишем, используя формулу Мейсона [6], приведенную к виду

$$\underline{I}_{ij} = \underline{E}_0 H_{ij} = \underline{E}_0 \frac{\sum_{k=1}^m P_{ijk} \Delta_{ijk}}{\Delta_j},$$

где $\underline{I}_{ij}$ – входной ток i -го ПТЦ в j -ом такте измерения; $\underline{E}_0$ – значение напряжения источника сигнала ИС; H_{ij} – системная функция измерительной цепи, определяемая отношением значения тока, измеряемой i -м ПТЦ в j -м такте измерения, к значению тока ИС; m – число возможных цепей передачи через i -й ПТЦ в j -м такте измерения; P_{ijk} – величина k -й цепи передачи через i -й ПТЦ в j -м такте измерения; Δ_{ijk} – алгебраическое дополнение k -й цепи передачи через i -й ПТЦ в j -м такте измерения; Δ_j – определитель ИЦ в j -м такте измерения.

При выполнении первого такта измерения ключ К1 по сигналу, формируемому БУ по команде МБУ (рис. 1) подсоединяет первый выход a ИС к первому зажиму e измерительной МЭЦ, а ключ К2 по сигналу, формируемому БУ

по команде МБУ подсоединяет второй выход b ИС через ПТЦ1 к четвертому зажиму d ИМЭЦ, при этом значения токов $\underline{I}_{11}$ и $\underline{I}_{21}$ на входах ПТЦ1 и ПТЦ2 определяются через параметры ИЦ как:

$$\underline{I}_{11} = \underline{E}_0 \frac{Z_2 + Z_x + Z_0 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_{nmq2}}{\Delta_1},$$

$$\underline{I}_{21} = \underline{E}_0 \frac{Z_x}{\Delta_1}.$$

По результатам измерения в первом такте вычисляется отношение численных значения модулей токов на выходах ПТЦ1 и ПТЦ2:

$$\frac{N_{11}}{N_{21}} = \frac{n_1 I_{11}}{n_2 I_{21}} = \frac{n_1 (Z_2 + Z_x + Z_0 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_{nmq2})}{n_2 Z_x}, \quad (1)$$

где $N_{11} = n_1 I_{11}$, $N_{21} = n_2 I_{21}$; n_1, n_2 – значения коэффициентов передачи ПТЦ1 и ПТЦ2.

Во втором такте измерения ключ К1 по сигналу, формируемому БУ по команде МБУ (рис. 1), подсоединяет первый выход a ИС к первому зажиму f ОМЭЦ, а ключ К2 по сигналу, формируемому БУ по команде МБУ, подсоединяет второй выход b ИС через ПТЦ1 к четвертому зажиму g ОМЭЦ, при этом значения токов $\underline{I}_{12}$ и $\underline{I}_{22}$ на входах ПТЦ1 и ПТЦ2 определяются через параметры ИЦ как:

$$\underline{I}_{12} = \underline{E}_0 \frac{Z_2 + Z_x + Z_0 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_{nmq2}}{\Delta_2},$$

$$\underline{I}_{22} = \underline{E}_0 \frac{Z_0}{\Delta_2},$$

По результатам измерения во втором такте вычисляется отношение численных значения модулей токов на выходах ПТЦ1 и ПТЦ2:

$$\frac{N_{12}}{N_{22}} = \frac{n_1 I_{12}}{n_2 I_{22}} = \frac{n_1 (Z_2 + Z_x + Z_0 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_{nmq2})}{n_2 Z_0}, \quad (2)$$

где $N_{12}=n_1 I_{12}$ и $N_{22}=n_2 I_{22}$; n_1 и n_2 – значения коэффициентов передачи ПТЦ1 и ПТЦ2.

Результат измерения модуля комплексного сопротивления исследуемого двухполюсника после двух тактов изменения конфигурации измерительной цепи вычисляется в МБУ:

$$\frac{N_{12} N_{21}}{N_{11} N_{22}} = \frac{I_{12} I_{21}}{I_{11} I_{22}} = \frac{Z_x}{Z_0} = \frac{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}}{\alpha}.$$

где β и γ – составляющие исследуемого комплексного сопротивления двухэлементного двухполюсника, соответственно, однородная (β) и неоднородная (γ) по характеру образцовому двухполюснику α .

Полученный результат отсчета модуля пассивного комплексного сопротивления двухполюсника, расположенного в ИМЭЦ типа Н, не зависит от величин внутреннего комплексного сопротивления источника сигнала ИС, комплексных сопротивлений не измеряемых двух

полюсников $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8$, внутренних комплексных сопротивлений ПТЦ1 и ПТЦ2.

Предлагаемый способ измерений позволяет избежать систематической ошибки при определении параметров как комплексного сопротивления отдельного двухполюсника, так и комплексного сопротивления двухполюсника, включенного в одну из ветвей Н-образной измерительной цепи. Эта ошибка возникает из-за влияния на результаты измерения исследуемого комплексного сопротивления, а также комплексных сопротивлений, находящихся в других ветвях измерительной и эталонной цепей, влияния ненулевых значений входных комплексных сопротивлений преобразователей типа ПТЦ1 и ПТЦ2, и конечного значения внутреннего комплексного сопротивления источника сигнала.

Метрологические параметры разработанного прибора были подтверждены экспериментально при измерениях на постоянном токе с применением эталонных резисторов Р331 в диапазоне от 10 Ом до 100 кОм.

Результаты измерений, представленные в таблице, демонстрируют возможность высокоточного измерения сопротивлений резисторов с допустимым отклонением от 0,005 до 0,05 % в диапазоне от 10 до 100000 Ом, при этом относительная погрешность измерений составляет 0,0005–0,003 %.

Результаты измерений

Диапазоны	Номинальное значение сопротивления, Ом	Ток, мА	Погрешность сравнения, %		
			при отклонении 0,01 % от R_0	при отклонении -50 %; +100 % от R_0	при отклонении -70 %; +200 % от R_0
1	10	10	0,0005	-	-
2	100	10	0,0003	-	-
3	1000	10	0,0001	0,0001	0,0001; 0,0015
4	1000	1	0,0001	0,0015	0,0015
5	10000	1	0,0001	0,0015	0,003
6	100000	0,1	0,0001	0,001	0,001; 0,003

Предложенный микропроцессорный измерительный прибор предоставляет возможность с высокой точностью определять характеристики комплексного сопротивления двухполюсника как самостоятельного элемента, так и в составе многополюсной электрической цепи Т-образной конфигурации. Данный метод применим даже при отсутствии доступа к одной из точек подключения исследуемого двухполюсника, или в МЭЦ Н-типа, когда затруднен дос-

туп к двум точкам для подключения исследуемого двухполюсника.

Разработанный прибор также может быть применен для удаленного измерения номинального сопротивления тензорезистора, используемого в схеме компенсации температурной зависимости объекта исследования. Подключение к измерительной цепи в этом случае осуществляется по двойной Т-образной схеме замещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бобылев, Д. А.* Подход к построению универсальных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев, Л. П. Боровских // Измерительная техника. – 2014. – № 12. – С. 47–51.
2. *Иванов, В. И.* Преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с уравниванием токов / В. И. Иванов, В. С. Титов, Д. А. Голубов // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 2. – С. 73–78.
3. *Kazakov, V. A.* Calculating parameters of two-terminal networks from discrete readings of circuit output voltages / V. A. Kazakov A. N. Andreev, A. V. Svetlov, D. A. Svetlov // Measurement Techniques, Aug. 1999. – Vol. 42, Issue 8. – P. 746–750.
4. АС №1211667 СССР: МПК G 01 R 27/02. Микропроцессорное устройство для измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника многополюсной электрической цепи (его варианты) / Г. И. Шаронов. – № 3502861/24-21; заявл. 14.10.82; опубл. 15.02.86. Бюл. № 6.
5. *Шаронов, Г. И.* Микропроцессорный комплекс для измерений модуля и составляющих комплексного сопротивления двухполюсника в многополюсной электрической цепи / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // Измерительная техника. – 2016. – № 11. – С. 40–43.
6. *Nise, Norman S.* Control Systems Engineering, Seventh Edition / Norman S. Nise. – Hupokàn: John Wiley & Sons, Inc., 2014. – 944 p.

УДК 629.3-592.3

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-44-55

Б. Н. Белоусов¹, Р. А. Лапенков¹, А. М. Щербин¹, М. П. Малиновский^{1, 2}
КРАТКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ТОРМОЗА ДЛЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН

¹ ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

² Московский автомобильно-дорожный государственный
 технический университет (МАДИ)

belousovbn@yandex.ru, roman.lapenkov@nami.ru, alexey.scherbin@nami.ru
 m.malinovskiy@nami.ru

Автор, ответственный за переписку:

Михаил Павлович Малиновский, m.malinovskiy@nami.ru

В условиях электрификации и интеллектуализации современных автомобилей возрастает спрос на электромеханические тормозные системы. Однако ни один конструктивный вариант электромеханического привода рабочей тормозной системы пока не внедрен в серийное производство, несмотря на множество патентов. В данной статье рассматривается состояние разработки электромеханических тормозов на основе патентных исследований. Электромеханические тормоза на автотранспортных средствах применяют в качестве исполнительных устройств, преобразующих электрическую энергию в поступательное движение штока разжимающего устройства тормозного механизма. Анализируя базовую структуру с использованием принципа членения сложных систем, электромеханический тормоз подразделяется на пять модулей: рабочего, стояночного, компенсации зазора, быстрого возврата и датчика.

Ключевые слова: электромобиль, электробус, электромеханический тормозной привод, разжимающее устройство, тормозная система, мехатроника

B. N. Belousov¹, R. A. Lapenkov¹, A. M. Shcherbin¹, M. P. Malinovsky^{1, 2}

BRIEF ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL
BRAKE DESIGN FOR WHEELED VEHICLES

¹ Federal State Unitary Enterprise “Central Scientific Research Automobile
 and Automotive Engines Institute” (FSUE “NAMI”)

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

In the context of electrification and intellectualization of modern cars, the demand for electromechanical braking systems is increasing. However, not a single design variant of the electromechanical drive of the service brake system has yet been introduced into serial production, despite numerous patents. This article examines the state of development of electromechanical brakes based on patent research. Electromechanical brakes on motor vehicles are used as actuators that convert electrical energy into the translational movement of the rod of the release device of the brake mechanism. Analyzing the basic structure using the principle of dividing complex systems, the electromechanical brake is divided into five modules: service, parking, clearance compensation, quick return and sensor.

Keywords: electric vehicle, electric bus, electromechanical brake drive, release device, brake system, mechatronics

В качестве исполнительных устройств рабочей тормозной системы на колесных транспортных средствах используют колодочные барабанные или дисковые механизмы, размещенные, как правило, непосредственно в ступицах колес. В качестве разжимного устройства, которое пре-

образует энергию тормозного привода в приводное усилие тормозного механизма, традиционно используют гидроцилиндры (при наличии гидравлического или пневмогидравлического привода), а также кулачковые (в пневматических приводах) и клиновые разжимные устройства.

Однако на современных электромобилях и электробусах [1–2], получающих все большее распространение, несмотря на два существенно сдерживающих фактора – ограниченный запас хода [3–5], особенно с учетом климатических условий, требующих термостатирования батареи [6], обогрева [7–8] или кондиционирования [9] салона, и чрезмерное время зарядки тяговых батарей [10–14], по ряду причин целесообразно отказаться от лишних энергоносителей в приводах систем управления [15] и использовать электромеханические тормоза (ЭМТ), в которых усилие создается с помощью электромоторов. Стояночный электромеханический тормозной привод впервые был применен в 2001 г. на серийных седанах «Lancia Thesis» и «BMW» 7 серии, позже он появился на «Audi A8» (2006 г.) и «Volkswagen Passat» (2008 г.), а вскоре заменил ручной механический привод прямого действия на многих автомобилях различного класса [16], например, на последней модели ГАЗ Соболь NN.

При проведении научных исследований было обнаружено более 200 международных патентов за последние 10 лет в данной области.

Ведущими странами в разработке ЭМТ являются Германия, Южная Корея, США [17].

Существующие приводы ЭМТ разработаны на основе конструкции традиционных дисковых и барабанных тормозов. Благодаря преимуществам, присущим дисковым тормозным технологиям, и сложности интеграции ЭМТ барабанного типа на стандартную колесную часть, ЭМТ дискового типа в настоящее время превалирует, но не исключено, что в будущем ситуация изменится. Примерно до середины 2010 годов казалось, что барабанные тормоза – это анахронизм. Однако с появлением электромобилей тенденция изменилась. Барабанные тормоза стоят на задних колесах таких современных автомобилей, как «Volkswagen ID.4» и «Volkswagen ID.3», «Skoda Enyaq iV» и «Audi Q4 e-tron», а компания «Continental» предлагает ставить барабанные тормоза не только на задние, но и на передние колеса, так как для используемой на электромобилях системы рекуперативного торможения они оказались эффективнее, чем дисковые.

Характеристики типовых структурных схем ЭМТ [18] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики схем электромеханических тормозов

Производитель	Механизм преобразования движения	Редукционный механизм/ Механизм самоторможения
Bosch	Шариковый винт	Планетарная зубчатая передача
	Реечная передача	Механизм самоторможения с двойной клиновой поверхностью
Siemens	Винтовой	Механизм самоторможения с несколькими клиновыми поверхностями
Continental Teves	Шариковый винт	Цилиндрическая зубчатая передача/ планетарная передача
Delphi	Шариковый винт (кольцевого типа)	Планетарная передача
Hyundai	Скользкий ходовой винт	Цилиндрическая передача/планетарная передача/червячная передача
	Винтовой	Механизм самоторможения с несколькими клиновыми поверхностями
Mando	Шариковый винт	Винтовая передача/планетарная передача/составная зубчатая передача

Привод ЭМТ дискового типа, предложенный компанией «Mando» (WO2020149695), показан в качестве примера на рис. 1. Привод разделен на несколько модулей. Модуль рабочего тормоза используется для выполнения основной операции торможения и состоит из электромотора, механизма усиления, механизма преобразования движения и прижимного элемента. Во время торможения электромотор 1041 приводит во вра-

щение шпиндель 1032 через винтовую зубчатую передачу 2050 (механизм усиления). Вращательное движение шпинделя 1032 преобразуется в поступательное движение шариковой гайки 1031 через винт 1030 (механизм преобразования движения), тем самым приводя в движение поршень 1020 (прижимной элемент) с тормозной колодкой 1013 для нажатия на тормозной диск 1011. Со стороны вала входной косозубой

шестерни к приводу добавлен модуль стояночного тормоза, состоящий из исполнительного механизма, подвижного элемента и запирающего элемента. Когда требуется парковка, усилие стояночного тормоза сначала достигается за счет модуля рабочего тормоза, затем подается питание на соленоид 2080 (исполнительный механизм), и толкатель 2081 (подвижный элемент) перемещается на определенное расстояние, чтобы заблокировать храповик 1053 (запирающий

элемент) для поддержания достаточной тормозной силы при отключении питания. Кроме того, на конце вала выходной косозубой шестерни привод оснащен торсионной пружиной 2090 (возвратным модулем), один конец которой закреплен на корпусе, а другой – на выходной косозубой шестерне. Пружина накапливает упругую энергию за счет деформации кручения, которую можно использовать для быстрого отпущения тормоза.

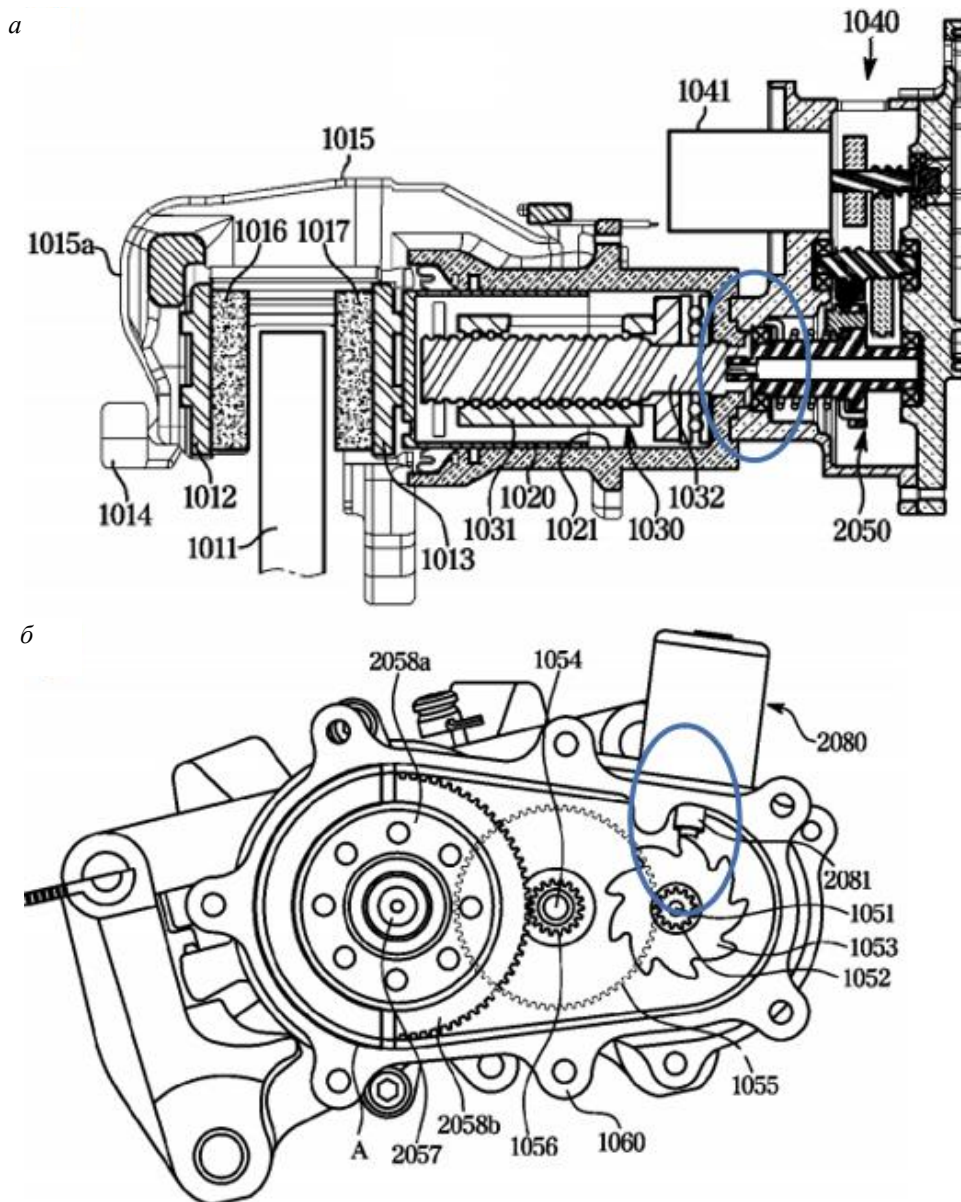


Рис. 1. Конструкция дискового ЭМТ «Mando» (Южная Корея):

а) модуль рабочего тормоза; 1011 – диск; 1012, 1013 – тормозные колодки; 1014 – держатель; 1015 – корпус суппорта; 1016, 1017 – фрикционные накладки; 1020 – поршень; 1021 – цилиндр; 1030 – винтовой узел; 1031 – шариковая гайка; 1032 – шпindel; 1040 – исполнительный механизм (актуатор); 1041 – электромотор; 2050 – редуктор; *б)* модуль стояночного тормоза; 1051 – входной вал; 1052 – первая косозубая шестерня; 1053 – храповый механизм; 1054 – промежуточный вал; 1055 – вторая косозубая шестерня; 1056 – третья косозубая шестерня; 1060 – корпус; 2057 – выходной вал; 2058 – четвертая косозубая шестерня; 2080 – соленоид; 2081 – толкатель

В дополнение к трем вышеупомянутым модулям привод ЭМТ может включать в себя модуль компенсации тормозного зазора вследствие износа тормозных колодок и модуль датчиков для обнаружения таких сигналов, как усилие прижима, для точного управления тормозным усилием. Таким образом, базовая кон-

фигурация привода ЭМТ включает пять основных модулей (рис. 2):

- 1) модуль рабочего тормоза;
- 2) модуль стояночного тормоза;
- 3) модуль компенсации зазора;
- 4) возвратный модуль;
- 5) модуль датчиков.

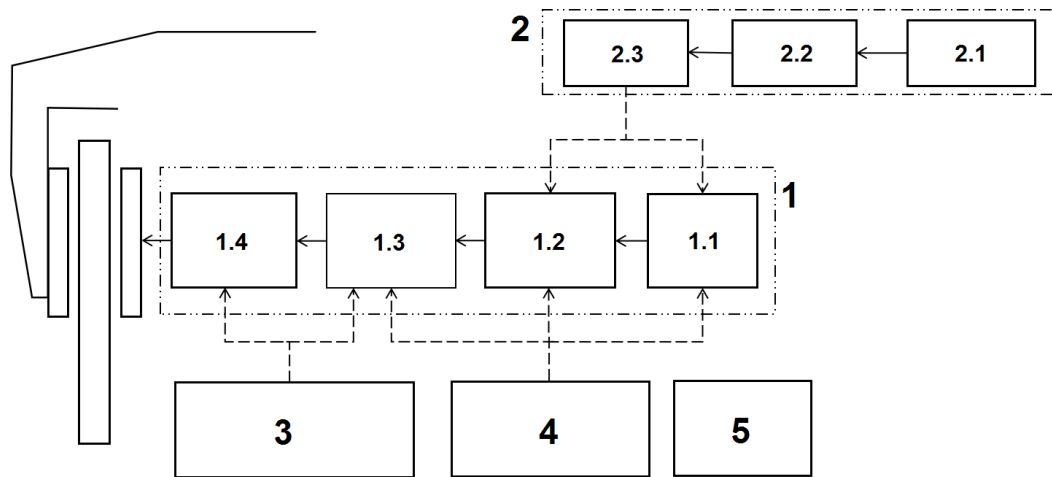


Рис. 2. Базовая конфигурация привода ЭМТ дискового типа:

1 – модуль рабочего тормоза; 1.1 – электродвигатель; 1.2 – механизм усиления; 1.3 – механизм преобразования движения; 1.4 – прижимной элемент; 2 – модуль стояночного тормоза; 2.1 – исполнительный механизм; 2.2 – подвижный элемент; 2.3 – запирающий элемент; 3 – модуль компенсации зазора; 4 – возвратный модуль; 5 – модуль датчиков

Функции каждого модуля и типовые схемы, предлагаемые разными производителями, представлены ниже.

Патентные исследования показали, что механизм преобразования движения бывает винтовой, кулачковый, шариковый или реечный. Шарико-винтовая и роliko-винтовая передачи преобразуют трение скольжения в трение качения посредством соответственно шариков или роликов, благодаря чему обладают более высокими эффективностью и точностью передачи, плавным движением и хорошей надежностью. Эти два типа обычно используются в ЭМТ. Кроме того, для перемещения прижимного устройства используется механизм кулачкового привода, который имеет простую конструкцию и надежную передачу усилия, однако быстро изнашивается и не может передавать большое усилие.

Механизм привода шариковой рамп (ball in ramp, BIR) использует качение шариков по рампе для достижения осевого смещения. Компании «Bosch», «Hyundai» и «Mando» последовательно предлагали разные конструктивные схемы шариковой рамп. Типичная конструкция (KR20200094377) показана на рис. 3. Механизм привода шариковой рамп имеет компактную (с небольшими осевыми размерами), но сложную конструкцию.

Типичной самотормозящей схемой является электронный клиновой тормоз, который преобразует тангенциальную силу трения тормозного диска в усилие прижатия через клиновой механизм. Компании «Bosch», «Siemens», «Hyundai» и «Continental Teves» предложили различные схемы самоторможения клинового типа. В зависимости от количества клиньев можно выделить три типа механизма (рис. 4):

- с одним клином («Bosch», DE10356936);
- с двойным клином («Hyundai», KR20070104058);
- с несколькими клиньями («Siemens», DE102006038824).

Одиночная клиновидная поверхность может обеспечить только однонаправленный эффект самоторможения, в то время как двойные и множественные клиновидные поверхности могут обеспечить эффект самоторможения в двух направлениях. Распределение прижимной силы, создаваемой механизмом с несколькими клиньями, более равномерное, но его структура более сложная. Поскольку эффект самоторможения не связан линейно со смещением и зависит от многих факторов, таких как погрешность обработки и износ, усилие торможения, создаваемое схемой самоторможения клинового типа, трудно контролировать.

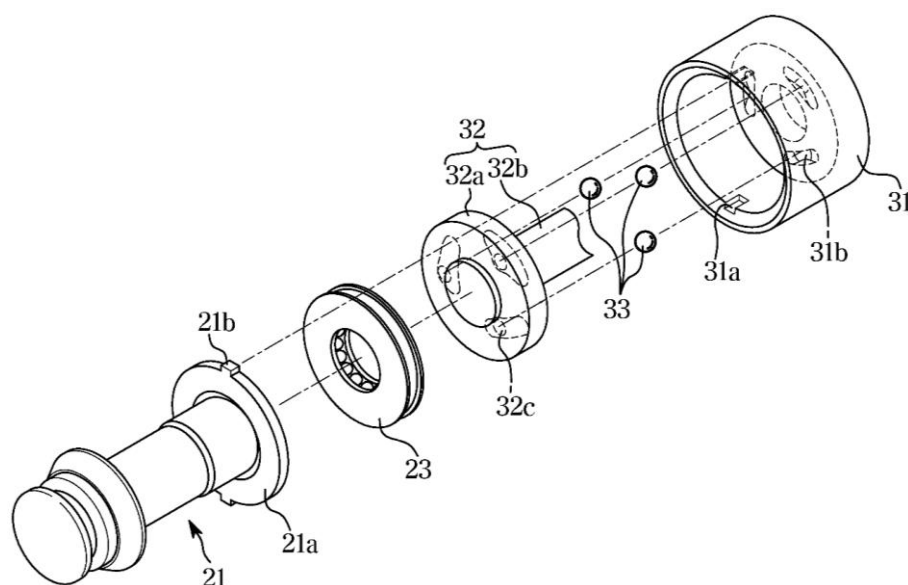


Рис. 3. Механизм привода шариковой рампы «Mando»:

21 – толкающий элемент; 23 – упорный подшипник; 31 – неподвижная рампа;
32 – вращающаяся рампа; 33 – шарик

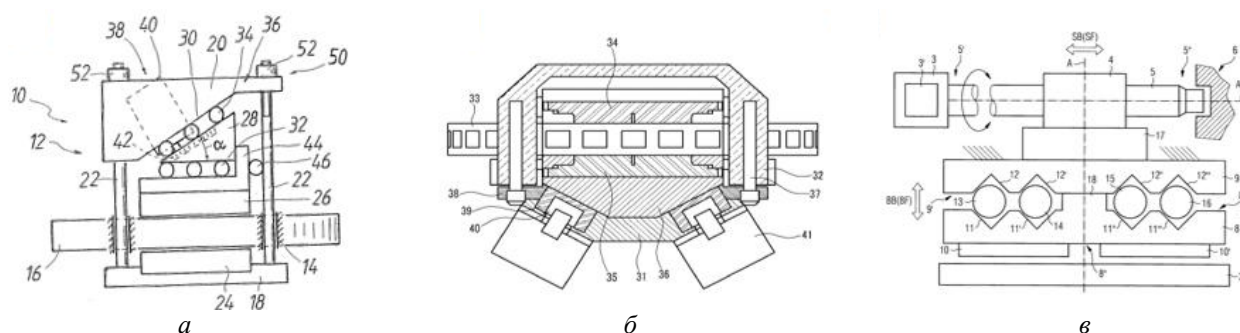


Рис. 4. Три типа клинового самотормозящего механизма:

а – один клин; б – двойной клин; в – несколько клиньев

Следует отметить, что электромагнитные обмотки используются, как правило, в стояночном тормозе с соленоидным приводом для изменения распределения магнитного поля, тем самым приводя в действие соответствующие компоненты для обеспечения блокировки тормоза. Компонент соленоида должен иметь бистабильные характеристики, то есть поддерживать два устойчивых состояния блокировки и отпускания при подаче питания. Компании «Bosch», «ContinentalTeves», «Hyundai» и «Mando» активно патентуют свои изобретения. Среди предложенных схем основным трендом стал электромагнитный привод стояночного тормоза, поскольку его конструкция проста и компактна. Преимущества и недостатки различных схем с электромагнитным (соленоидным) приводом заключаются в следующем [18]:

1) схемы, использующие фрикционные компоненты, могут обеспечить гибкое управление блокировкой и тормозной силой, а процесс торможения производится стабильно, без ударов, однако природа трения приводит к проблеме плохой термической стабильности и долговечности;

2) схемы, использующие собачку и храповик, могут поддерживать относительно большое тормозное усилие, но собачка может чрезмерно выдвигаться, вызывая постоянное воздействие на храповик, и могут возникнуть дополнительные проблемы, такие как износ и деформация, что снижает надежность тормоза;

3) схемы, использующие ролик и рампу, обеспечивают плавный процесс блокировки и могут создавать определенный эффект самоторможения. Однако угол наклона и положение рампы трудно подобрать для обеспечения эффекта блокировки;

4) схемы с использованием штифта и шестерни просты по конструкции, но при отделении стопорного штифта от зубьев шестерни возможно заедание, что снижает быстродей-

ствие и стабильность действия стояночного тормоза.

Типичные схемы стояночного тормоза приведены в табл. 2.

Таблица 2

Типичные схемы стояночного тормоза

Производитель	Движущий элемент	Подвижный элемент	Запирающий элемент
Bosch	Соленоид	Диск якоря/толкатель	Фрикционный элемент/собачка-храповик/роликовый рамп/самоблокирующийся
Continental	Соленоид	Толкатель/тяга	Стопорный штифт-шестерня/ролик-пандус/собачка-храповик
Delphi	Электромотор/соленоид/ручной	Резьбовой винт/рычаг/пружина/плунжер	Замок ручного тормоза/выступ-зуб/собачка-храповик/зубчатая шестерня
Hyundai	Электромотор/соленоид	Резьбовой винт/толкатель/перегородка/эластичная пластина	Стопорный штифт-шестерня/перегородка-шестерня/собачка-храповик
Mando	Соленоид	Толкатель	Защелка-храповик/фрикционные элементы/вращающаяся штифтовая передача
Siemens	Ручной	Трос	Блокировка роликового пандуса/ручного тормоза

Конструкция стояночного тормоза при использовании ЭМТ делится на два типа:

1) ручной стояночный тормоз;

2) привод стояночного тормоза от дополнительного электромотора.

В дополнение к основной функции стояночного тормоза, то есть обеспечения парковки, он также может использоваться для ручного управления тормозом в случае сбоя питания или электрической системы, то есть выполнять функцию запасной тормозной системы.

На рис. 5 в качестве примера показан вспомогательный тормоз «Siemens» (EP1138971) на основе традиционной конструкции ЭМТ. Посредством троса S втулка H приводится во вращение, и ролики K1...K3 входят в зацепление с валом RW ротора для блокировки электромотора.

Как показано на рис. 6, «Delphi» (US6401879) использует дополнительный электромотор 30 для приведения гайки 36 в движение через винт 34, а рычаг 40 нажимается на фрикционный диск 20, тем самым предотвращая вращение вала основного электромотора 15 и обеспечивая стояночное торможение. Электромотор стояночного тормоза получает сигнал тормо-

жения от электронного блока управления, а затем точно регулирует расстояние подачи подвижного элемента. По сравнению со схемой с соленоидным приводом, это позволяет уменьшить износ, вызванный чрезмерной или недостаточной подачей подвижного элемента.

Электромагнитные обмотки используются в стояночном тормозе с электромагнитным приводом для изменения распределения магнитного поля, тем самым приводя в действие соответствующие компоненты для достижения блокировки тормоза. Элементы соленоида должны обладать бистабильными характеристиками, то есть – поддерживать два стабильных состояния блокировки и расцепления при отключении питания. На рис. 7 представлена одна из типичных схем стояночного тормоза «Bosch» (US6471017) с электромагнитным приводом и фрикционными элементами. На электромагнитный тормоз 10 подается напряжение для создания обратного магнитного поля и освобождения диска 28 якоря. С помощью упругой силы спиральной пружины 26 диск 28 якоря прижимается к соединительному диску 36, блокируя вал 38 электромотора и поддерживая усилие стояночного тормоза.

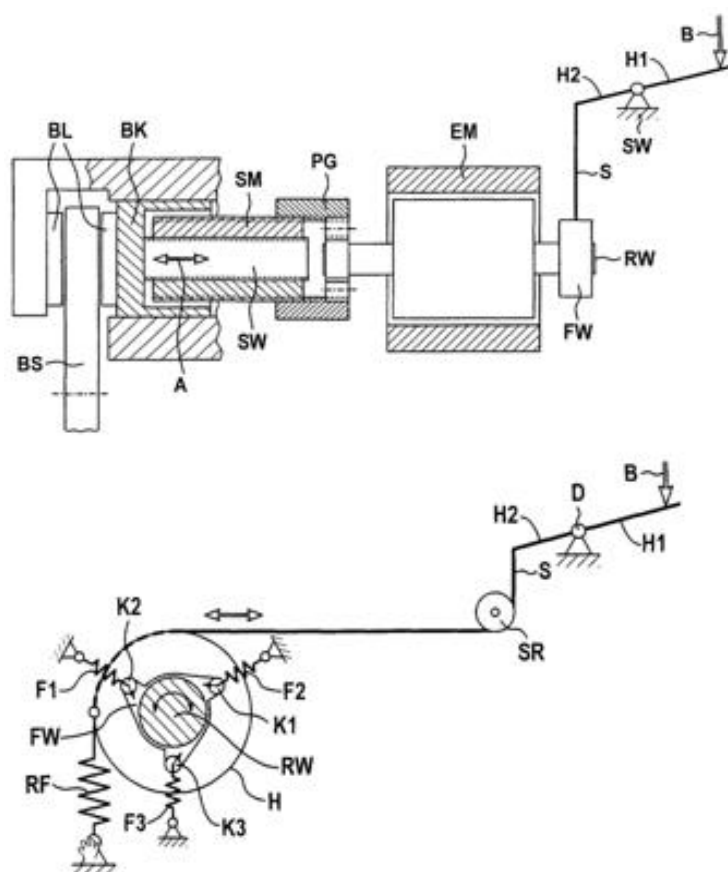


Рис. 5. Топология ручного стояночного тормоза «Siemens»:

EM – электродвигатель; RW – вал ротора; SM – шпindel; PG – планетарная передача; SW – шпиндельный вал; A – поступательное движение в осевом направлении; SM – гайка шпинделя; BK – поршень; BL – тормозные колодки; BS – тормозной диск; B – дополнительный тормоз; FW – свободный ход; H1/H2 – передаточное отношение рабочего рычага; D – точка поворота; S – тросовая тяга; SR – тросовый шкив; RF – возвратная пружина; F1...F3 – пружина растяжения; K1...K3 – зажимной ролик; H – барабан

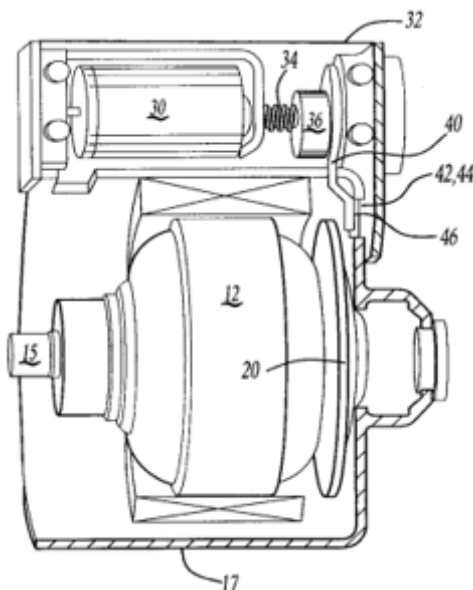


Рис. 6. Стояночный тормоз «Delphi» с приводом от электромотора:

12 – электродвигатель суппорта; 15 – вал; 17 – первый корпус; 20 – фрикционное колесо; 30 – электродвигатель стояночного тормоза; 32 – второй корпус; 34 – трапецидальный винт; 36 – трапецидальная гайка; 40 – рычаг; 42, 44 – прорезь; 46 – фрикционная поверхность

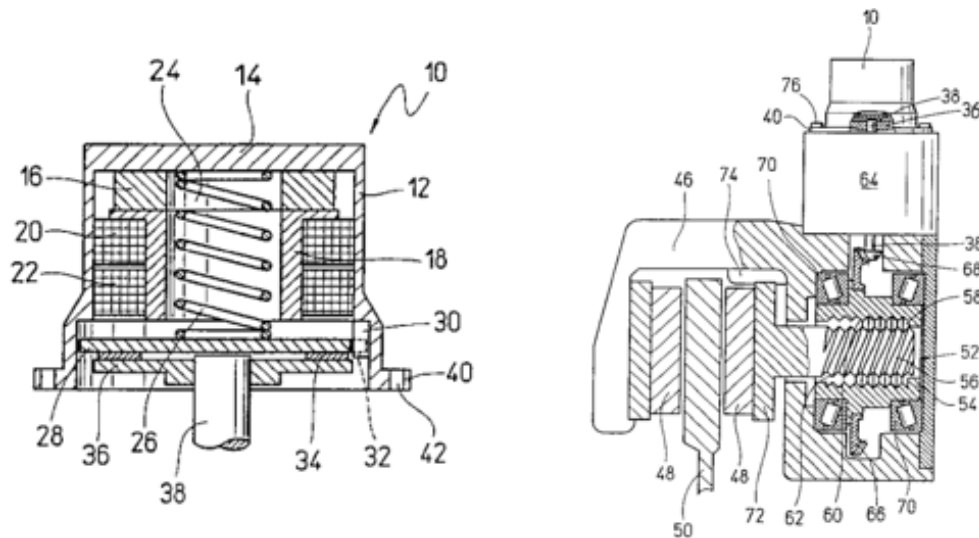


Рис. 7. Стояночный тормоз «Bosch» с электромагнитным приводом:

10 – электромагнитный тормоз; 12 – корпус из ферромагнитного материала; 14 – дно корпуса; 16 – постоянный магнит; 18 – магнитный сердечник; 20, 22 – магнитная катушка; 24 – цилиндрическая полость; 26 – пружина сжатия; 28 – якорь; 30 – шлицы; 32 – канавки; 34 – тормозная накладка; 36 – соединительный диск; 38 – вал; 40 – винтовой фланец; 42 – винтовые отверстия; 46 – плавающий суппорт; 48 – тормозные накладки; 50 – тормозной диск; 52 – привод шпинделя; 54 – гайка шпинделя; 56 – резьбовой шпиндель; 58 – профильные ролики; 60 – шпиндельная гайка; 62 – резьба шпинделя; 64 – гайка; 66 – пластинчатое зубчатое колесо; 68 – коническое зубчатое колесо; 70 – радиально-упорные роликовые подшипники; 72 – тормозная колодка; 74 – шлицы; 76 – винты

Главное направление разработки технических решений при создании автомобильного ЭМТ заключается в разработке и патентовании технических решений, обеспечивающих более компактную конфигурацию устройства растормаживания и компенсации тормозного зазора и других функций тормозной системы для более надежного торможения. Привод ЭМТ представляет собой высоко интегрированную электромеханическую систему. Управление двигателем для достижения быстрого, точного и надежного отслеживания целевого тормозного усилия, находится в центре внимания текущих исследований, но эта тема осталась за границами данного патентного поиска.

В ходе анализа были найдены ряд патентов с техническими решениями, близкими к предлагаемым в рамках настоящих исследований:

1) Заявка US20200049215, по которой выданы патенты CN110821992, KR102139586 и US11187292 – конструкция на основе винтовой передачи и червячного редуктора (рис. 8);

2) Заявка US20220242384, по которой выдан патент US12252104, а также опубликованы заявки CN114834415, DE102022200985 и KR2022011528. Предложена конструкция на основе шарико-винтовой передачи (ШВП) и винтового механизма регулировки зазора (рис. 9);

3) Заявка US20220025947, по которой выдан патент US11815143, а также опубликована за-

явка KR20220011282. Ключевым предложением является сложный механизм регулировки зазоров в ШВП (рис. 10);

4) заявка WO2014026522, по которой выдан патент CN102785648. Предложена конструкция на основе ШВП и редуктора (рис. 11);

5) патент KR101549995 (рис. 12);

6) патент KR102145987. Предложена конструкция с ШВП и цилиндрическим редуктором (рис. 13).

Таким образом, ЭМТ обладает рядом достоинств, таких как быстрая реакция, точное регулирование усилия, возможность интегрированного управления. Однако все еще существуют некоторые проблемы, например, плохое резервирование, высокая стоимость, серьезные тепловые помехи.

Обобщая существующие конструкции, предложенные различными производителями, можно сделать следующие выводы:

1. Для модуля рабочего тормоза преобразование движения обычно реализуется в виде винтовой передачи (особенно шарикового или роликового винта).

Механизм уменьшения (в виде планетарной зубчатой передачи) или механизм усиления (представленный самотормозящим клиновым механизмом) в основном используются для решения проблемы недостаточной движущей силы электромотора.

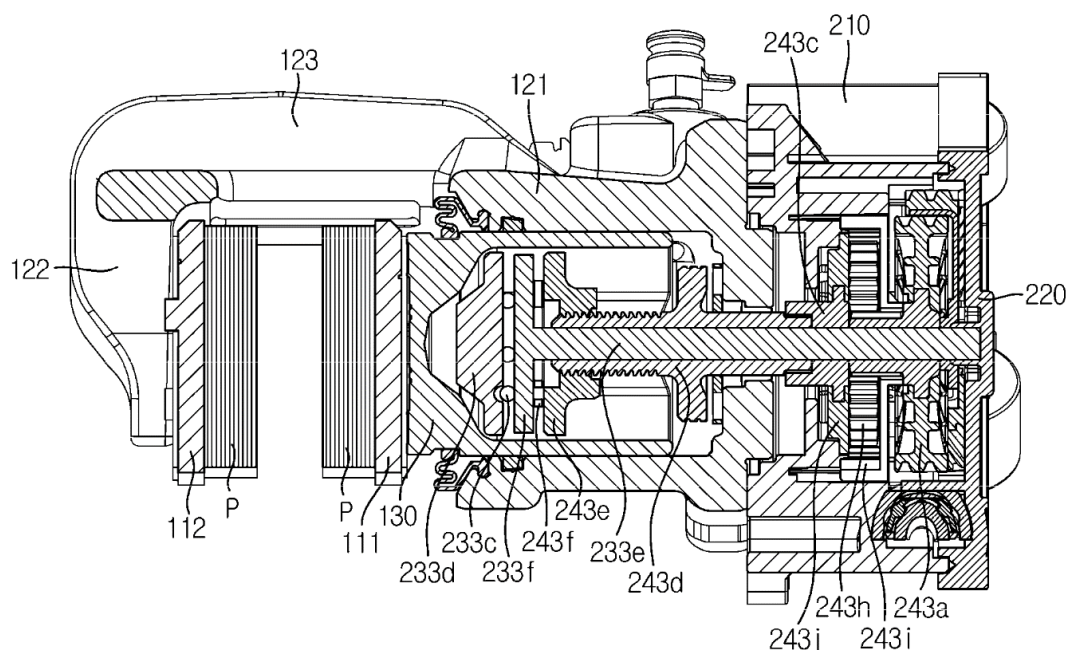


Рис. 8. Конструкция фирмы «Mando» (US20200049215):

111, 112 – внутренняя и внешняя тормозная колодка соответственно; P – фрикционные накладки; 121, 122 – цилиндрическая часть и пальцевая часть корпуса суппорта; 123 – соединительная часть корпуса суппорта; 130 – поршень; 210 – корпус привода; 220 – крышка; 233, 243 – первый и второй блок передачи мощности

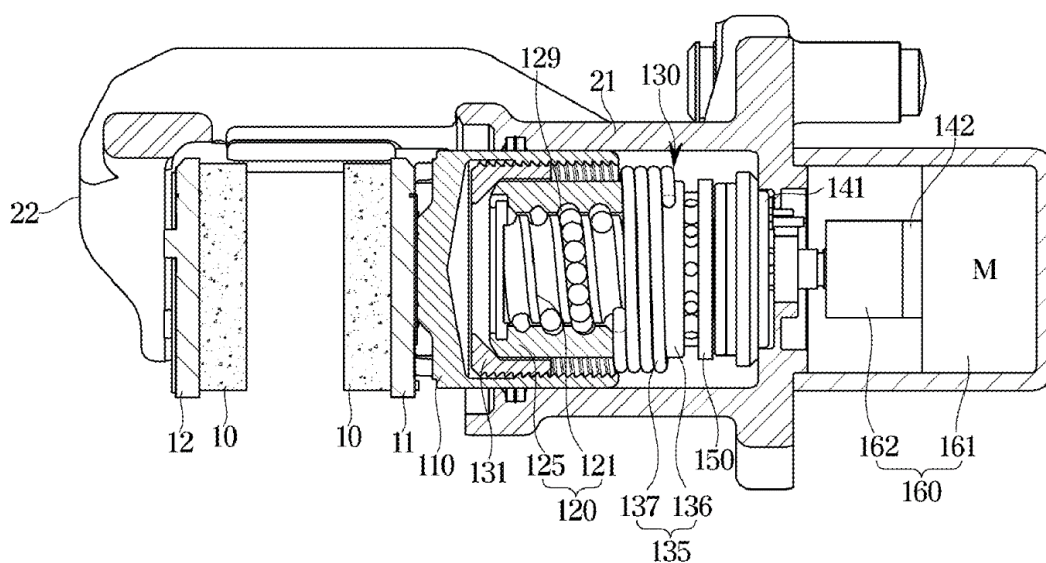


Рис. 9. Конструкция фирмы «Mando» (US20220242384):

10 – фрикционные накладки; 11, 12 – тормозные колодки; 21, 22 – цилиндрическая и пальцевая часть корпуса суппорта; 110 – поршень; 120 – механизм преобразования движения; 121 – винт; 125 – гайка; 129 – шарики; 130 – регулятор зазора для компенсации износа; 131 – регулировочный винт; 135 – регулировочный элемент; 136 – фланец; 137 – торсионная пружина; 141 – датчик силы прижатия колодки к диску; 142 – датчик положения ротора электромотора; 150 – подшипник; 160 – исполнительный механизм (актуатор); 161 – электромотор; 162 – редуктор

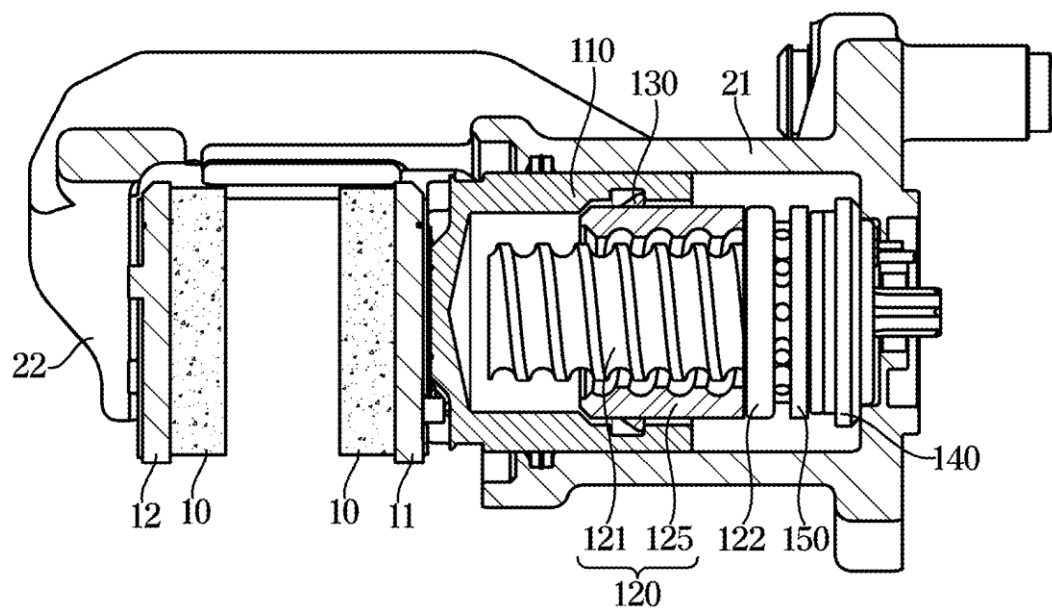


Рис. 10. Конструкция фирмы «Mando» (US20220025947):
 10, 11, 12, 21, 22, 110, 120, 121, 125, 150 – см. рис. 9; 122 – фланец;
 130 – фиксирующий выступ; 140 – датчик силы прижатия колодки к диску

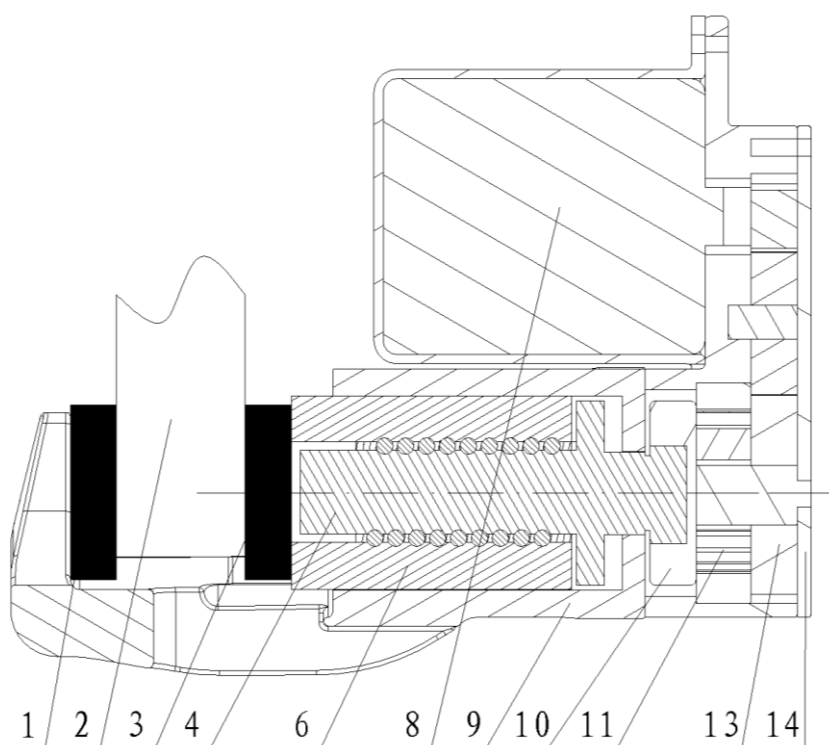


Рис. 11. Конструкция фирмы «Chery» (WO2014026522):
 1, 3 – тормозные колодки; 2 – тормозной диск; 4 – винт; 6 – гайка; 8 – электромотор;
 9 – корпус; 10 – водило; 11 – планетарная шестерня; 13 – редуктор; 14 – крышка

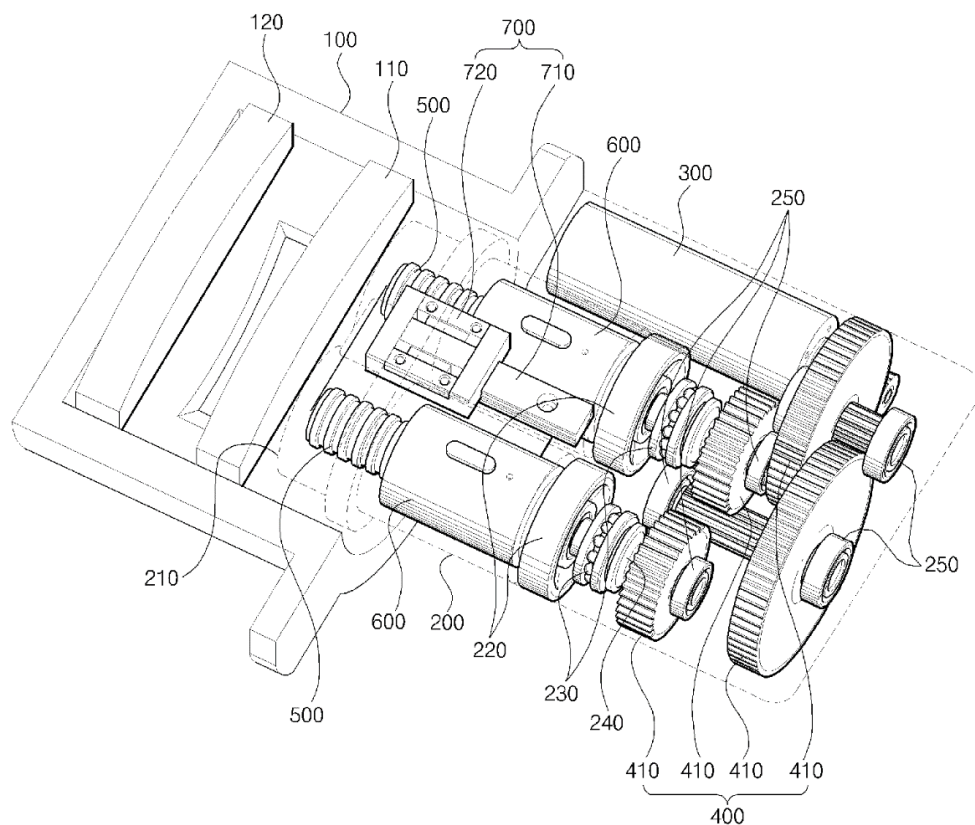


Рис. 12. Конструкция Института науки и технологий Тэгу Кенбук (KR101549995):
 100 – суппорт; 110, 120 – тормозная колодка; 200 – корпус; 210 – поршень; 220 – радиально-упорный роликовый подшипник; 230 – упорный шариковый подшипник; 240 – стопорная гайка; 250 – радиальный шариковый подшипник; 300 – электромотор; 400 – редуктор; 410 – шестерня; 500 – винт; 600 – гайка; 700 – регулятор зазора для компенсации износа

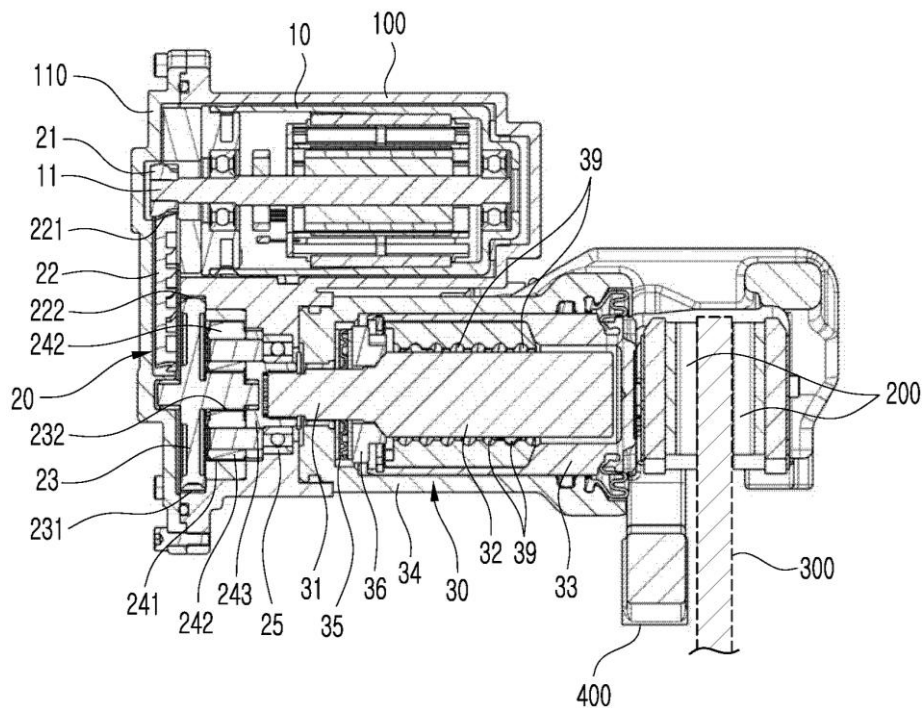


Рис. 13. Конструкция фирмы ERAE AMS (KR102145987):
 10 – электромотор; 11 – выходной вал; 20 – редуктор; 21 – выходная шестерня электромотора; 22, 23 – первая и вторая промежуточная шестерня; 241 – коронная шестерня; 242 – планетарная шестерня; 243 – водило; 25 – подшипник; 30 – линейный привод; 31 – вал шарико-винтовой передачи (ШВП); 32 – винт; 33 – поршень; 34 – корпус; 35 – подшипник; 36 – гайка; 39 – шарики; 100 – корпус электромотора; 110 – крышка корпуса; 200 – тормозные колодки; 300 – тормозной диск; 400 – суппорт

2. Модуль стояночного тормоза в зависимости от используемых приводных элементов можно подразделить на три типа: ручной, с приводом от электромотора и с электромагнитным приводом. Среди них схема с электромагнитным приводом стала основной схемой, поскольку ее структура проста и компактна.

3. Модуль компенсации зазора в зависимости от свойств материала используемых компонентов можно подразделить на три типа: гибкий, жесткий и гибридный. Последний сочетает в себе характеристики первых двух схем, благодаря чему контроль тормозного зазора является более точным и надежным, а процесс компенсации – более плавным.

4. Для модуля быстрого возврата обычно используются пружины кручения, сжатия или другие упругие элементы для накопления энергии упругости и реализации быстрого растормаживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутарович, Д. О. Метод разработки энергоэффективного закона управления электробусом при движении по городскому маршруту / Д. О. Бутарович, Б. Б. Косицын, Г. О. Котиев // Труды НАМИ. – 2017. – № 2(269). – С. 16–27. – EDN ZCSOZF.
2. Блудян, Н. О. Перспективы развития электрических автобусов / Н. О. Блудян // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 3(62). – С. 19–24. – EDN XDGHTT.
3. Еварестов, В. М. Исследование данных по изменению степени заряженности тяговых аккумуляторных батарей электробусов на маршрутах города Москвы / В. М. Еварестов, В. А. Максимов, Н. В. Поживило // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2021. – № 2(58). – С. 31–36. – EDN TDOLKA.
4. Сидоров, К. М. К вопросу исследования влияния работы климатической установки на запас хода автомобиля / К. М. Сидоров, В. Н. Козловский, Д. И. Панюков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 11. – С. 410–412. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-410-411. – EDN FYQZBH.
5. Жердев, П. И. Способы увеличения пробега и анализ силовых установок электрифицированных транспортных средств / П. И. Жердев, К. Е. Карпунин // Труды НАМИ. – 2024. – № 3(298). – С. 92–100. – DOI 10.51187/0135-3152-2024-3-92-100. – EDN NRDXZZ.
6. Солнцев, А. А. Совершенствование технологии термостатирования аккумуляторных батарей электробусов / А. А. Солнцев, А. Р. Асоян, Н. В. Лобов [и др.] // Грузовик. – 2022. – № 10. – С. 32–34. – DOI 10.36652/1684-1298-2022-10-32-34. – EDN ASKTUT.
7. Ночевкин, Е. О. Реализация высоковольтных систем отопления салона современных электромобилей / Е. О. Ночевкин, К. М. Сидоров // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2019. – № 2(20). – С. 2. – EDN FKRMHQ.
8. Девянин, С. Н. Проблемы развития электропривода АТС / С. Н. Девянин, А. В. Шабанов, А. А. Савастенко // Автомобильная промышленность. – 2021. – № 12. – С. 4–7. – EDN YGUXTB.
9. Ермаков, А. М. Исследование эффективности работы климатической установки электробуса в холодное время года / А. М. Ермаков, Р. Р. Салахов, Э. Е. Данилов, Р. М. Хисматуллин // Грузовик. – 2023. – № 2. – С. 14–20. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-2-14-20. – EDN KCGMJF.
10. Голубчик, Т. В. Определение характеристик зарядных станций для электротранспорта / Т. В. Голубчик // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 86. – EDN TGQCND.
11. Феофанов, С. А. Электробусы и зарядная инфраструктура в условиях мегаполисов / С. А. Феофанов, Е. М. Лайко, Л. С. Феофанова // Автомобильная промышленность. – 2019. – № 2. – С. 31–35. – EDN YUZZJK.
12. Максимов, В. А. Методический подход к оценке эффективности работы ультрабыстрых зарядных станций электробусов / В. А. Максимов, В. М. Еварестов, Г. А. Крылов [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2023. – № 3(74). – С. 69–79. – EDN KJBZEX.
13. Нестеренко, Г. А. Применение зарядных станций для транспортных средств на электрической тяге / Г. А. Нестеренко, И. С. Нестеренко // Автомобильная промышленность. – 2023. – № 7. – С. 18–20. – EDN BGTROP.
14. Фам, Х. Ш. Актуальные задачи в области совершенствования и дальнейшего развития зарядной инфраструктуры / Х. Ш. Фам, К. М. Сидоров // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 25–28. – EDN WVRQNX.
15. Лапенков, Р. А. Перспективы применения приводов пневматического и гидравлического типа на автомобильном транспорте / Р. А. Лапенков, А. М. Щербин, М. П. Малиновский // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2024. – № 4(49). – С. 92–96. – DOI 10.35211/2500-0586-2024-4-49-92-96. – EDN XSTKQO.
16. Лапенков, Р. А. Анализ архитектуры и топологии электромеханической тормозной системы для колесных транспортных средств / Р. А. Лапенков, М. П. Малиновский, М. В. Григорьев, А. В. Анисимов, А. А. Галимов, А. Н. Лысков // Автомобильная промышленность. – 2025. – № 6. – С. 7–14. – EDN CWQAFA.
17. Patent search results for the design of electromechanical brakes / B. N. Belousov, A. M. Shcherbin, M. P. Malinovsky, M. V. Grigoriev, A. V. Anisimov, A. A. Galimov // Science Journal of Transportation. – 2024. – No. 4(20). – P. 24–35. – EDN HSOPJK.
18. Li C., Zhuo G., Tang C., Xiong L., Tian W., Qiao L., Cheng Y., Duan Y. A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – P. 4514. – DOI: 10.3390/su15054514.

УДК 629.357-531.751.3

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-56-64

*М. П. Малиновский^{1, 2}, Е. С. Смолко^{1, 2}, А. М. Щербин¹, А. Э. Карьялайнен¹***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ
НА ОСЯХ НАТУРНОЙ МОДЕЛИ ПЯТИОСНОГО АВТОПОЕЗДА
С НЕЗАВИСИМОЙ ПОДВЕСКОЙ**¹ ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»² Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)m.malinovskiy@nami.ru, evgeny.smolko@nami.ru, alexey.scherbin@nami.ru
a.karyalainen@nami.ru

Автор, ответственный за переписку:

Михаил Павлович Малиновский, m.malinovskiy@nami.ru

При проектировании автотранспортного средства возникает необходимость решать задачи по нахождению его центра масс при известных значениях нагрузок на оси и по расчету вертикальных реакций при известных координатах центра масс. Данные задачи имеют элементарное решение для двухосных автомобилей и трехосных грузовиков с балансирной тележкой. Однако при наличии независимой подвески, характерной для шасси и автопоездов специального назначения, задача становится статически неопределимой, начиная от трех осей и более. Авторами настоящей статьи был проведен эксперимент по определению фактического распределения вертикальных реакций по осям макета двухзвенного автопоезда.

Ключевые слова: транспортные средства специального назначения, компоновка, многоосные шасси, статически неопределимая система, информационный дефицит

*M. P. Malinovsky^{1, 2}, E. S. Smolko^{1, 2}, A. M. Shcherbin¹, A. E. Karyalainen¹***EXPERIMENTAL DETERMINATION OF VERTICAL REACTIONS
ON THE AXLES OF A FULL-SCALE MODEL OF A FIVE-AXLE
ROAD TRAIN WITH INDEPENDENT SUSPENSION**¹ Federal State Unitary Enterprise “Central Scientific Research Automobile
and Automotive Engines Institute” (FSUE “NAMI”)² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

When designing a motor vehicle, it is necessary to solve problems of finding its center of mass for known values of axle loads and calculating vertical reactions for known coordinates of the center of mass. These problems have an elementary solution for two-axle cars and three-axle trucks with a balance bogie. However, in the presence of independent suspension, typical for chassis and special-purpose road trains, the problem becomes statically indeterminate starting from three axles and more. The authors of this article conducted an experiment to determine the actual distribution of vertical reactions along the axes of a two-link road train model.

Keywords: special purpose vehicles, wheel arrangement, multi-axle chassis, statically indeterminate system, information deficit

При проектировании любого транспортного средства, в том числе специального назначения (ТССН), всегда решается *прямая* задача – определение центра масс прототипа [1], расположение которого существенно влияет на устойчивость [2], управляемость [3], плавность хода [4–6] и ряд других эксплуатационных свойств [7]. Впоследствии возникает необходимость решать *обратную* задачу по определению фактических вертикальных реакций при известном центре масс для решения широкого спектра проблем:

1. Для расчета автоматического регулятора тормозных сил [8] и тормозной эффективности в целом [9].

2. Для адекватной работы алгоритмов различных систем активной безопасности [10], в том числе антиблокировочной системы (АБС) [11–14], противобуксовочной системы (ПБС) [15], системы динамической стабилизации (СДС) [16].

3. Для расчета состояний эластичного колеса в процессе движения [17–18], в том числе углов увода [19], явления шимми [20], динамического радиуса колес [21] и его влияния на кинематику поворота [22].

4. Для расчета балки колесного моста на прочность [23].

5. Для расчета крена [24] и дифферента [25] поддресорных масс.

6. Для расчета распределения мощности в трансмиссии [26] и процессов ее циркуляции [27].

7. Для прогнозирования и моделирования долговечности несущей системы и ходовой части [28–29].

8. Для расчета нагрузки на дорожное покрытие [30–31], мостовые сооружения [32] и настил наплавных паромов [33].

Кроме того, в технике являются актуальными идеи по увеличению вертикальных реакций для улучшения управляемости [34] или загрузки сельскохозяйственного технологического оборудования [35]. Электронно-управляемая пневматическая подвеска ECASWABCO позволяет разгружать одну из пары задних осей грузового автомобиля с целью увеличения сцепного веса.

Для двухосной схемы [36–38] и трехосной схемы с задней балансирной подвеской [39] задача была решена будущим академиком Е. А. Чудаковым еще в 1930 году [40]. Для трех осей с балансирной тележкой распределение реакций принимается аналогичным двухосной схеме, и в статике это допустимо. Однако, как показывает опыт испытаний на полигоне ФГУП «НАМИ», при резком торможении задняя ось тележки грузового автомобиля блокируется раньше, чем средняя. Значит, под действием сил инерции в пределах самой тележки также про-

исходит перераспределение веса и вертикальных реакций [41]. Кроме того, нельзя не учитывать циркуляцию мощности в тяговом режиме [42], что особенно актуально для полноприводных шасси многоцелевого назначения.

На трехосных полуприцепах, например, «УралСпецТранс», как правило, применяется независимая подвеска двух типов: рессорно-балансирная (рис. 1, *а*) и пневматическая (рис. 1, *б*). В первом случае полуэллиптические продольные рессоры удерживают каждую ось полуприцепа, при этом на раме закреплены ушки крайних рессор, что обеспечивает безопасность всей установки. Свободные концы соседних рессор соединяются между собой качающимся балансиром. Такая конструкция обеспечивает независимый ход колес по вертикали. При движении рессоры являются амортизирующим элементом, воспринимая вертикальную и боковую нагрузку. Тяговая и тормозная силы передаются реактивными штангами. Рессорно-балансирная подвеска является наиболее жесткой среди всех типов, обеспечивая максимальную устойчивость полуприцепа на дороге. Применение рессорной подвески оптимально для прицепной техники, эксплуатирующейся на дорогах общего пользования и по умеренному бездорожью. Среди преимуществ рессорной подвески можно отметить ее дешевизну, надежность и долговечность.

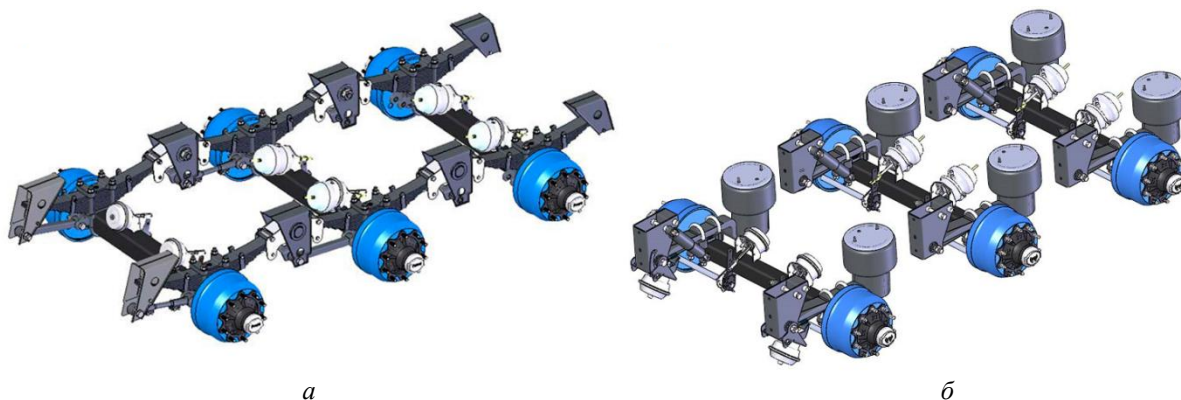


Рис. 1. Типы независимой подвески «УралСпецТранс» для трехосных полуприцепов:
а – рессорно-балансирная; *б* – пневматическая

Пневматическая подвеска все чаще применяется на современных моделях прицепной техники. Рама полуприцепа соединяется с колесными осями резиновыми упругими элементами, в которых компрессором поддерживается высокое давление, регулируемое в зависимости от загрузки. Жесткую связь осей с рамой обес-

печивают полурессоры, а раскачку на неровностях гасят установленные диагонально амортизаторы.

ТССН оснащаются преимущественно независимой подвеской колес, поэтому даже для трехосного тягача задача становится статически неопределимой, не говоря уже о многоос-

ных шасси [43] и автопоездах [44]. Так, для шестиосного шасси БАЗ-69099 в паспортных данных приведено распределение массы на передние три оси и на задние три оси, что является серьезным упрощением.

Современные калькуляторы загрузки коммерческих автопоездов, применяемые в логистике, считают, что масса по осям полуприцепа распределяется равномерно (рис. 2), что также является допущением [45].

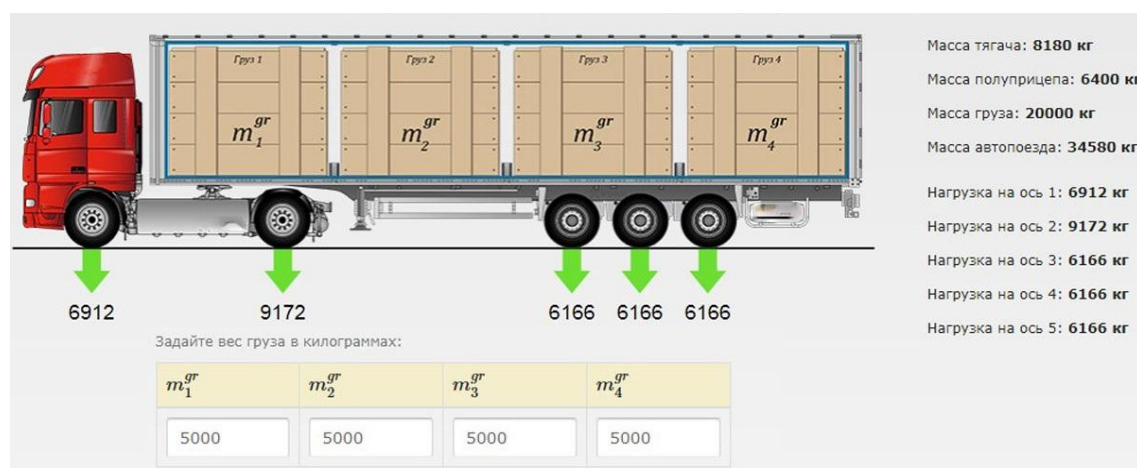


Рис. 2. Калькулятор загрузки автопоезда

Более реалистичной представляется схема автопоезда из учебных материалов В. А. Горелова (рис. 3), однако и ее точность требует проверки.

Более реалистичной представляется схема автопоезда из учебных материалов В. А. Горелова (рис. 3), однако и ее точность требует проверки.

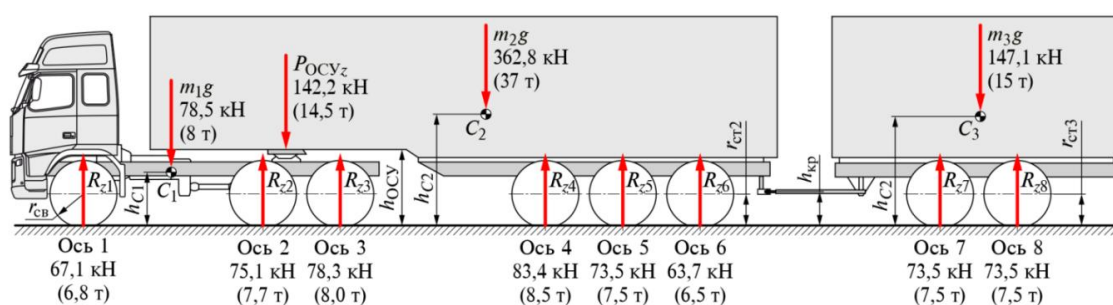


Рис. 3. Статическое распределение нагрузок по осям трехзвенного автопоезда

В сопротивлении материалов существуют различные методы для решения статически неопределимых задач, однако все они требуют адаптации и валидации применительно к автотранспортным средствам. С этой целью авторами были проведены экспериментальные исследования распределения веса по осям масштабной (1:12) модели автопоезда, состоящего из трехосного тягача и двухосного полуприцепа.

Сначала модель взвешивали в снаряженном состоянии, а затем для четырех вариантов размещения груза массой $m_r = 3,6$ кг (рис. 4):

- 1) m_{r45} – по центру между 4 и 5 осями полуприцепа;
- 2) $m_{r.cy}$ – над седельно-сцепным устройством (ССУ);
- 3) $m_{r.цп}$ – приблизительно в центре базы полуприцепа (на расстоянии $L_{цп} = 385$ мм от ССУ);

- 4) m_{r1} – над 1 осью тягача.

Для взвешивания масштабной модели автопоезда использовались измерительные весы с пределом измерения 10 кг и ценой деления 1 г. Колеса каждой оси устанавливались на отдельные весы (рис. 5).

Для каждого варианта размещения груза в соответствии с рис. 4 проводилось от 1 до 4 замеров, исходя из адекватности снятых показаний. Перед каждым замером к подвеске и весам прикладывалась небольшая предварительная нагрузка, чтобы исключить остаточные деформации от предыдущего опыта.

Результаты замеров приведены в табл. 1, а на рис. 6 представлен график распределения массы по осям автопоезда в зависимости от варианта размещения груза.

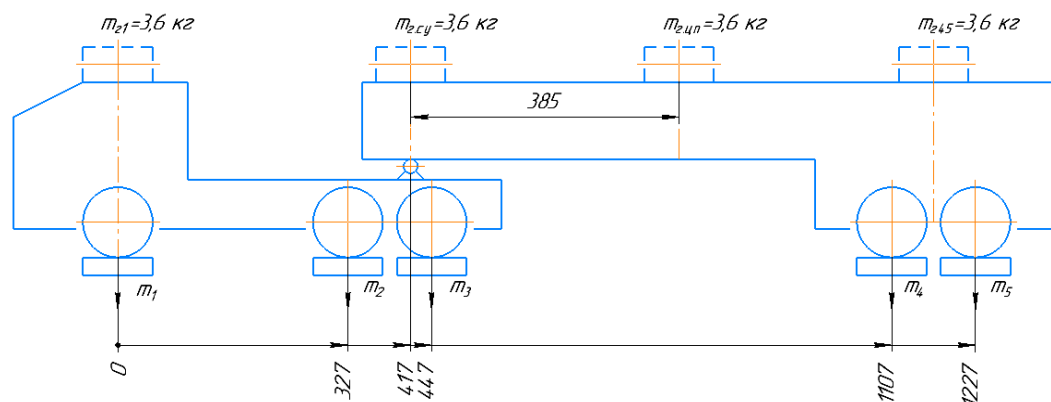


Рис. 4. Схема взвешивания автопоезда



Рис. 5. Установка колесной оси на измерительных весах

Таблица 1

Экспериментальное распределение массы модели автопоезда по осям

№	1 ось	2 ось	3 ось	4 ось	5 ось	Сумма
Снаряженная масса:						
1	3786	3055	2056	3187	2791	14875
2	3867	2771	2261	3117	2850	14866
3	3862	2808	2236	3104	2854	14864
4	3881	2751	2257	3086	2879	14854
Груз над 4 и 5 осями:						
5	3869	2760	2265	4880	4708	18482
6	3855	2825	2218	4721	4711	18330
Груз над CCY:						
7	3643	4595	4233	3269	2728	18468
8	3775	4065	4673	3223	2755	18491
Груз в центре полуприцепа:						
9	3771	3569	3300	4156	3691	18487
10	3775	3425	3325	4117	3710	18352
Груз над 1 осью:						
11	7507	3034	1976	3090	2869	18476

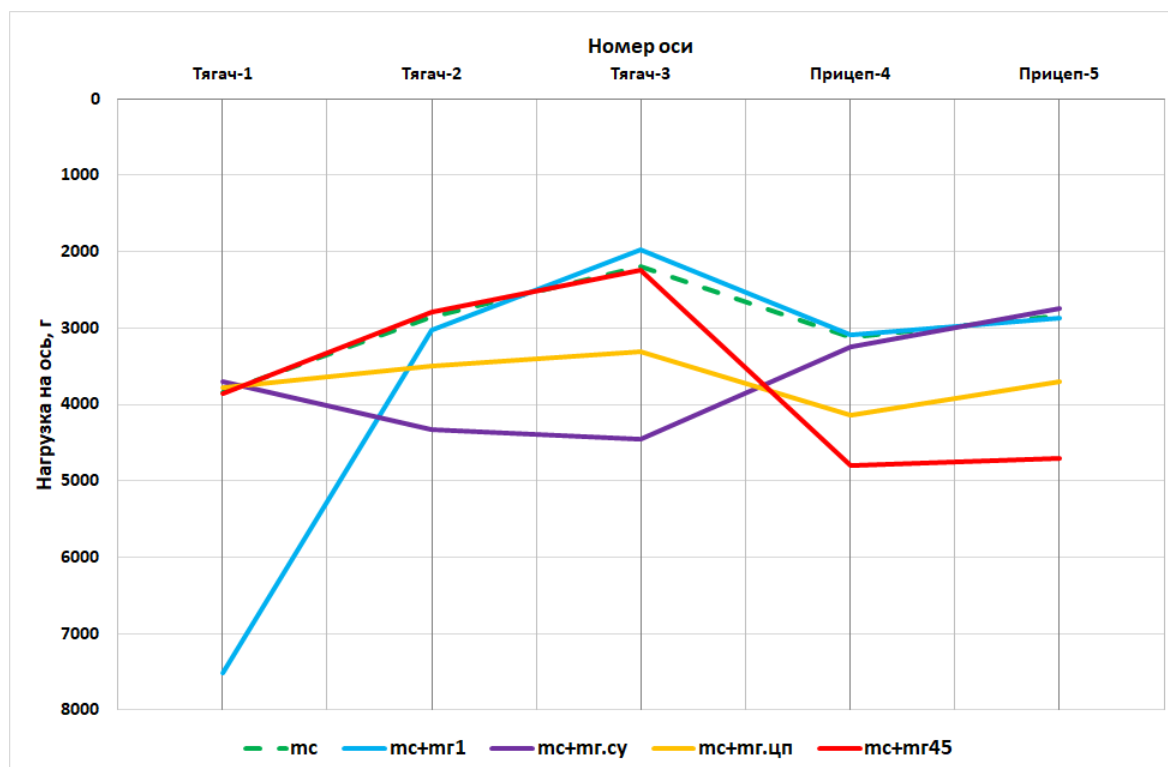
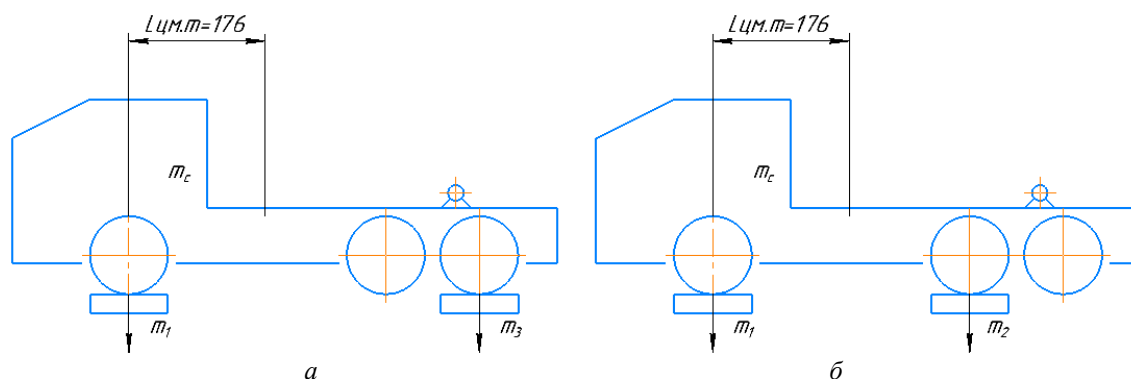


Рис. 6. Распределение массы автопоезда по осям при различном размещении груза

Дополнительно был проведен эксперимент по определению центра масс тягача в снаряженном состоянии отдельно от полуприцепа.

Чтобы задача стала статически определимой, необходимо и достаточно было установить тягач на две опоры (рис. 7).

Рис. 7. Схема взвешивания тягача для определения его центра масс:
а – вывешивание средней оси; б – вывешивание задней оси

Сначала измерительные весы были размещены под 1 и 3 осями модели тягача так, что средняя ось не касалась опорной поверхности и полностью разгрузилась. В этом случае расстояние от передней оси до центра масс тягача определялась по формуле:

$$L_{цм.m} = L_{1-3} \frac{m_3}{m_c},$$

где $L_{1-3} = 447$ мм – расстояние между передней и задней осями.

Затем весы разместили под 1 и 2 осями, разгрузив заднюю ось, и тогда формула приняла следующий вид:

$$L_{цм.m} = L_{1-2} \frac{m_2}{m_c},$$

где $L_{1-2} = 327$ мм – расстояние между передней и средней осями.

Для каждого варианта провели по два замера, результаты которых показали попарно между собой отличную сходимость (табл. 2), одна-

ко между двумя вариантами вывешивания погрешность составила 0,576 мм или 0,3 %, причину возникновения которой точно установить не удалось.

чину возникновения которой точно установить не удалось.

Таблица 2

Экспериментальное распределение массы модели тягача по осям

№	1 ось	2 ось	3 ось	Сумма
1	4308	–	2806	7114
2	4317	–	2801	7118
Среднее расстояние от 1 оси до центра масс тягача $L_{цм.т}$, мм				176,105
3	3284	3861	–	7145
4	3285	3860	–	7145
Среднее расстояние от 1 оси до центра масс тягача $L_{цм.т}$, мм				176,681

В целом, результаты эксперимента совпали с представлением о физике процесса и позволили сделать несколько важных выводов:

1. Из двух разнесенных осей больше загружена та, которая расположена ближе к центру тяжести.

2. При размещении груза над 1-й осью тягача нагрузка на 4-ю и 5-ю оси практически совпадает со снаряженной нагрузкой, при этом дифферент на нос тягача столь велик, что 3-я ось разгружается до значения меньшего, чем при снаряженной нагрузке, несмотря на внешнюю нагрузку на ССУ от полуприцепа.

3. При размещении груза посередине между 4-й и 5-й осями загрузка всех осей тягача также совпадает с исходным состоянием, то есть нагрузка на ССУ практически не изменяется.

4. Наиболее равномерного распределения веса автопоезда по осям удастся достичь при размещении груза посередине полуприцепа.

5. Размещение груза над ССУ оказался единственным вариантом, когда 3-я ось оказалась более загружена, чем 2-я, что логично, так как ССУ расположено ближе к задней оси тягача, чем к средней, при этом первая ось оказалась нагружена меньше, чем при снаряженной массе.

Проведенный эксперимент, несмотря на некоторые достигнутые промежуточные результаты, поставил целый ряд новых задач:

1. Определить центр масс полуприцепа и величину нагрузки на ССУ, для чего можно разместить измерительные весы между полуприцепом и тягачом (рис. 8).

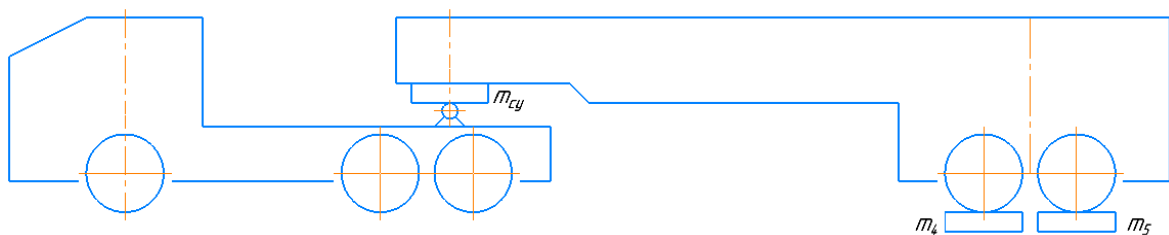


Рис. 8. Схема взвешивания полуприцепа для определения его центра масс

2. Установить, как влияют на распределение вертикальных реакций следующие факторы:

а) жесткость несущей системы. Для этого необходимо сравнить бесконечно жесткую балку, которая не будет деформироваться под собственным весом, и балку, поддающуюся изгибу (рис. 9, а);

б) наличие упругих элементов между несущей системой и весами, а также различная жесткость упругих элементов у разных осей (рис. 9, б). Известно, что на многоосных ТССН с не-

зависимой подвеской предпочитают делать одинаковой жесткость всех упругих элементов;

в) дифферент поддресоренных масс (рис. 9, в). При переезде даже единичной неровности, не говоря о групповых, одновременно происходят изменение дифферента и изгиб рамы, что целесообразно рассчитывать методом сложения итерационных процессов.

3. Провести исследования для большего числа осей, причем с различными вариантами компоновки (рис. 9, з).

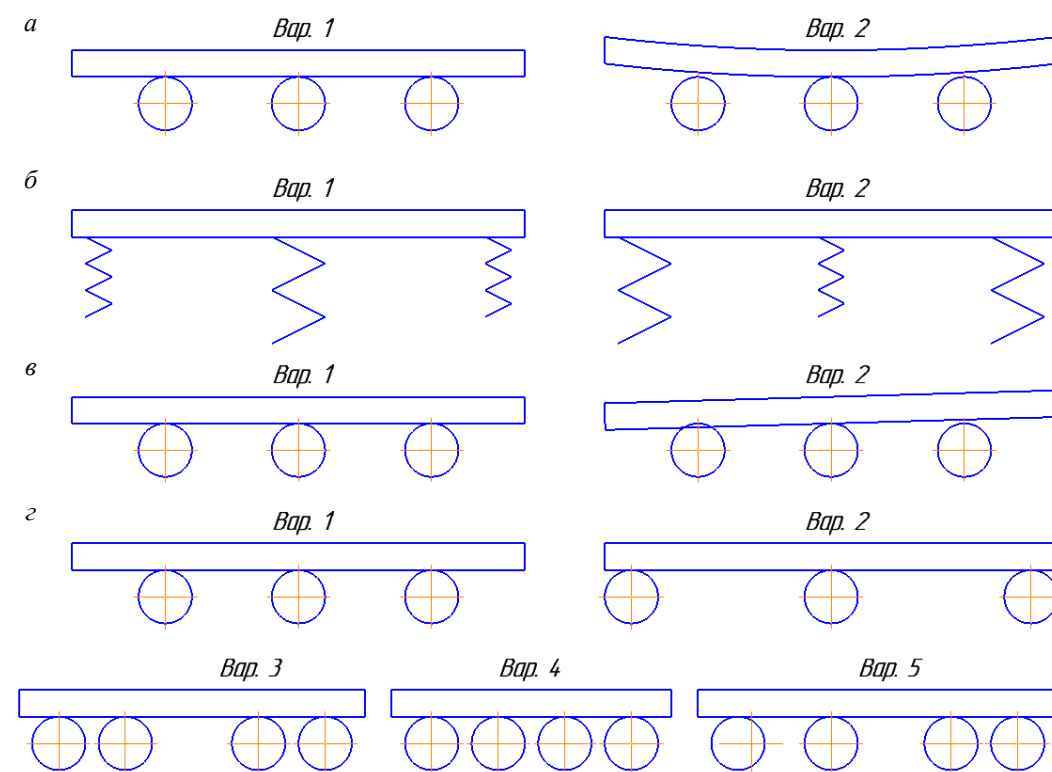


Рис. 9. Факторы, влияющие на распределение вертикальных реакций по осям:

а – жесткость несущей системы; б – жесткость упругих элементов; в – дифферент поддрессоренных масс; г – компоновка осей

Решению перечисленных задач планируется посвятить дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малиновский, М. П. Определение центра тяжести автотранспортного средства с использованием массогабаритных характеристик его агрегатов / М. П. Малиновский // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2020. – № 4(26). – С. 3. – EDN PRZYXY.
2. Гудков, В. А. Теоретическое исследование поперечной устойчивости автобуса особо малого класса семейства «Газель» / В. А. Гудков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов, М. Ш. Абдуллаев // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(34) / ВолГТУ. – Волгоград, 2007. – Т. 2. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 98–101. – EDN KWENXN.
3. Ходес, И. В. Поперечные угловые колебания двухосной колесной машины в режиме периодических подруливаний / И. В. Ходес, М. Ю. Илюхин // ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 91–96. – EDN НТКВJX.
4. Шиповалов, Д. А. Методика оптимизации параметров подвески по совокупности требований виброзащиты кузова и безотрывности качения колеса / Д. А. Шиповалов, Е. В. Балакина, А. А. Ревин // ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(34) / ВолГТУ. – Волгоград, 2007. – Т. 2. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 16–18. – EDN KWENMT.
5. Миронова, В. В. Динамические процессы автомобиля при наезде на ступенчатое препятствие / В. В. Миронова // Грузовик. – 2016. – № 11. – С. 20–26. – EDN XIPFQR.
6. Дергачев, Д. А. Экспериментальное исследование нормальной жесткости шины спортивного болида класса BAJA SAE / Д. А. Дергачев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2023. – № 4(45). – С. 37–43. – EDN RQPXJK.
7. Гладов, Г. И. Специальные транспортные средства: Проектирование и конструкции: учебник / Г. И. Гладов, А. М. Петренко; под ред. Г. И. Гладова. – М.: Академкнига, 2004. – 318 с. – ISBN 5-94628-134-8. – EDN QNSERL.
8. Попов, А. И. О моделировании процесса торможения транспортного средства категории М3 / А. И. Попов, А. В. Курипка // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 12. – С. 17–22. – EDN SOXWTR.
9. Малиновский, М. П. Применение итерационного метода при расчете тормозных свойств седельного автопоезда с учетом перераспределения вертикальных реакций / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Труды НАМИ. – 2020. – № 1(280). – С. 36–47. – DOI 10.51187/0135-3152-2020-1-36-47. – EDN CDJRIM.
10. Рязанцев, В. А. «Связанное управление» как метод при проектировании систем активной безопасности / В. А. Рязанцев // Труды НАМИ. – 2017. – № 4(271). – С. 62–66. – EDN YNJTDD.
11. Дыгало, В. Г. Верификация результатов моделирования тормозной динамики автомобиля с пневматической АБС / В. Г. Дыгало, В. В. Котов, Л. В. Дыгало, А. А. Ревин // ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 19(146) / ВолГТУ. – 2014. – Т. 9. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 16–20. – EDN TBCVGZ.
12. Карьялайнен, А. Э. Сложности динамического расчета пневматической антиблокировочной тормозной системы / А. Э. Карьялайнен, А. М. Шайхуллин // Энерго-

и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 2(39). – С. 41–44. – EDN WDNNGU.

13. Бахмутов, С. В. Развитие антиблокировочных систем современных автомобилей, включая электромобили и гибридные транспортные средства / С. В. Бахмутов, А. А. Умницын // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 3(60). – С. 42–51. – DOI 10.46864/1995-0470-2022-3-60-42-51. – EDN WXSQA.

14. Бойко, Г. В. Зависимость тормозного момента от времени при экстренном торможении автомобиля / Г. В. Бойко, А. П. Федин, И. В. Лесковец, М. Л. Петренко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2024. – № 4(49). – С. 96–100. – DOI 10.35211/2500-0586-2024-4-49-96-100. – EDN ALXQTA.

15. Малиновский, М. П. Повышение адаптивных свойств систем управления путем определения коэффициента сцепления бортовыми средствами в режиме реального времени / М. П. Малиновский // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 1(60). – С. 43–51. – EDN RTOQOI.

16. Малиновский, М. П. «Отскок подвески» и прогнозирующие свойства системы динамической стабилизации автопоезда / М. П. Малиновский // Автомобильная промышленность. – 2021. – № 12. – С. 12–16. – EDN YMOEFT.

17. Балакина, Е. В. Анализ факторов, определяющих текущее положение вектора поступательной скорости управляемого колеса / Е. В. Балакина // ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 59–67. – EDN HTKBHP.

18. Балакина, Е. В. Деформации эластичного колеса и их взаимосвязи со сносами реакций опорной поверхности / Е. В. Балакина, Н. М. Зотов, Т. А. Сторчилова // ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 19(146) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – Т. 9. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 5–8. – EDN TBCVFL.

19. Иванцов, В. Д. Аналитическое описание переходных процессов движения трактора на транспорте / В. Д. Иванцов, В. В. Скабелин, А. В. Иванцов, С. В. Иванцов // ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(89) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – Т. 5. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 24–28. – EDN OPVPCR.

20. Журавлев, В. Ф. Новая модель шимми / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов, П. К. Плотноков // Труды Математического института имени В. А. Стеклова. – 2013. – Т. 281. – С. 32. – DOI 10.1134/S0371968513020040. – EDN QZXEP.

21. Васильев, Ю. Э. Проведение экспериментальных работ по замеру динамического радиуса колеса при различных режимах вращения стелда / Ю. Э. Васильев, И. С. Братищев, И. О. Столетов // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 1(20). – С. 58. – EDN SDKDOL.

22. Балабин, И. В. Влияние деформации шин на кинематику ведущих колес при криволинейном движении мобильной машины / И. В. Балабин, О. И. Балабин, И. С. Чабунин // Автомобильная промышленность. – 2023. – № 10. – С. 13–14. – EDN JSGAJJ.

23. Савкин, А. Н. Анализ передней подвески малотоннажного грузового автомобиля / А. Н. Савкин, А. В. Андроник, С. Сатиш // Грузовик. – 2016. – № 1. – С. 3–12. – EDN VOIUGF.

24. Малиновский, М. П. О важности учета увода шин и крена несущей системы при расчете критической скорости по опрокидыванию грузового автомобиля / М. П. Малиновский // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2022. – № 4(34). – EDN EMLAPP.

25. Малиновский, М. П. Учет бортовыми средствами дифферента подрессоренных масс транспортного средства при определении его загрузки / М. П. Малиновский // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 10. – С. 18–23. – EDN DBRYIW.

26. Математическая модель алгоритма распределения момента по осям электромобиля с двухмоторной схемой / А. М. Заватский, В. В. Дебелов, А. Н. Мальшев, А. В. Келлер // Известия МГТУ МАМИ. – 2023. – Т. 17, № 2. – С. 187–194. – DOI 10.17816/2074-0530-123092. – EDN GSBXGN.

27. Прядкин, В. И. Анализ подходов по исследованию явления циркуляции мощности в трансмиссии полноприводного автомобиля / В. И. Прядкин, В. В. Гудков, П. А. Сокол // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 3(35). – С. 205–224. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/19. – EDN CMUXX.

28. Кузьмин, А. О. Создание стелда с беговыми барабанами для испытания мототехники на усталостную прочность / А. О. Кузьмин, Д. Е. Мещеряков // Труды МАМИ. – 2024. – № 2(297). – С. 66–77. – DOI 10.51187/0135-3152-2024-2-66-77. – EDN RFKXCX.

29. Дианов, В. А. Разработка методики моделирования нагруженности карьерного автосамосвала путем каскадирования внешних силовых факторов / В. А. Дианов, А. И. Бокарев, А. Б. Карташов // Труды МАМИ. – 2024. – № 3(298). – С. 57–70. – DOI 10.51187/0135-3152-2024-3-57-70. – EDN CGXMAI.

30. Носов, В. П. Повышение эффективности работы поперечных швов цементобетонных покрытий / В. П. Носов, Р. Н. Енилин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – № 3(42). – С. 73–81. – EDN UHNKWD.

31. Малиновский, М. П. Расчет давления на дорожное покрытие при торможении грузового автотранспорта в соответствии с действующим законодательством / М. П. Малиновский, А. А. Фотиади // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2022. – № 4(71). – С. 76–86. – EDN SJHLVL.

32. Агеев, В. Д. Анализ нелинейной работы мостоленты с помощью условных линий влияния / В. Д. Агеев, А. В. Агеев, Н. О. Рясной // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2018. – № 3(85). – С. 19–22. – EDN DBLZAU.

33. Зайцев, С. В. Спецоборудование амфибийных транспортных средств специального назначения: Наплавные мосты и паромы / С. В. Зайцев, М. Ю. Тимофеев. – М.: МАДИ, 2015. – 100 с. – ISBN 978-5-7962-0166-4. – EDN TLGEKJ.

34. Рязанцев, В. И. Сравнительная характеристика эффективности разных структур системы управления вертикальными реакциями дороги на колеса при движении автомобиля по неровностям / В. И. Рязанцев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2019. – № 3(28). – С. 6–10. – EDN TKODWF.

35. Ворохобин, А. В. Повышение устойчивости движения колесного трактора корректированием вертикальных нагрузок на колеса / А. В. Ворохобин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 13, № 4(67). – С. 63–72. – DOI 10.17238/issn2071-2243.2020.4.63. – EDN RFQZXA.

36. Шустов, А. В. Математическое моделирование движения малотоннажного автопоезда по участку дороги со случайным профилем / А. В. Шустов, С. В. Ганзин, Ю. Я. Комаров, Е. Ю. Липатов // ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(85) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – Т. 4. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 64–68. – EDN ONCMMB.

37. Гаевский, В. В. Проблемы применения интеллектуальных систем помощи водителю на одноколейных транспортных средствах / В. В. Гаевский, А. М. Иванов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 3(122). – С. 121–129. – DOI 10.46960/1816-210X_2018_3_121. – EDN YKKDSX.
38. Гришакин, В. Т. Теоретическая механика: практикум / В. Т. Гришакин. – М.: МАДИ, 2020. – 144 с. – EDN JOSJNV.
39. Баловнев, В. И. Автогрейдеры: учебное пособие / В. И. Баловнев, Р. Г. Данилов, Г. В. Кустарев, Н. Д. Селиверстов. – М.: МАДИ, 2014. – 144 с. – EDN TCOFWR.
40. Чудаков, Е. А. Тяговой расчет автомобиля. – М.; Л.: Гос. изд-во, Главтуз, 1930. – 250, [2] с.
41. Богомолов, В. А. Распределение нормальных реакций между мостами балансирной тележки грузового автомобиля при торможении / В. А. Богомолов, В. И. Клименко, Д. Н. Леонтьев, С. Н. Махлай // Автомобильный транспорт (Харьков). – 2019. – № 45. – С. 46–53. – DOI 10.30977/AT.2219-8342.2019.45.0.46. – EDN RFVFSB.
42. Гудков, В. В. Анализ циркуляции мощности в балансирной тележке автомобиля / В. В. Гудков, П. А. Сокол, А. А. Сафронов // Вестник научных конференций. – 2017. – № 1–5(17). – С. 63–65. – EDN XXHJYX.
43. Plotting the adhesion utilization curves for multi axle vehicles / V. A. Bogomolov, V. I. Klimenko, D. N. Leontiev, S. V. Ponikarovska, A. A. Kashkanov, V. Yu. Kucheruk // Bulletin of the Karaganda University. Physics Series. – 2021. – No. 1(101). – P. 35-45. – DOI 10.31489/2021Ph1/35-45. – EDN WEAGLG.
44. Солнцев, А. Н. Разработка математической модели движения экспериментального образца автопоезда большой грузоподъемности, состоящего из четырехосного тягача и активного полуприцепа / А. Н. Солнцев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2014. – № 2(2). – С. 11. – EDN TEANDV.
45. Курочкин, С. В. Адаптивный калькулятор загрузки автопоезда и его программная реализация / С. В. Курочкин // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 6. – С. 18–25. – EDN ZKFNU.

УДК 625.76:629.362.5

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-64-70

*С. В. Репин, Т. В. Виноградова, А. В. Николаев, В. Е. Чечуев
А. А. Абросимова, В. Е. Гордиенко*

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОГРУЗЧИКА ДЛЯ УБОРКИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ОТ СНЕГА

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

repinserge@mail.ru, tvin-205@yandex.ru, nav78spb@mail.ru, vchechuev@lan.spbgasu.ru
anzhelicka.abrosimova@yandex.ru, val-gor@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку:

Валерий Евгеньевич Гордиенко, val-gor@yandex.ru

Статья посвящена обоснованию параметров рабочего оборудования и разработке метода уборки снега с городских территорий, основанного на применении фронтальных погрузчиков с опрокидывающим рабочим оборудованием. Проведенный сравнительный анализ традиционных методов уборки снега (лаповые снегопогрузчики, фронтальные погрузчики с классическим ковшом) позволил выявить недостатки и ограничения существующих методов. Показано, что предложенная технология уборки снега, в которой предусмотрено использование опрокидывающего оборудования, позволяет устранить выявленные недостатки и значительно увеличить производительность уборки.

Новая конструкция фронтального погрузчика, снабженная возможностью задней разгрузки, предусматривает использование типового рабочего оборудования с минимальными изменениями, а также установку дополнительного оборудования, обеспечивающего заднюю разгрузку, а именно, желоб, закрепленный над кабиной посредством двуногих стоек и гидроцилиндров, закрепленных с боковых сторон на раме. Все операции, кроме разгрузки, производятся обычным для фронтальных погрузчиков способом. Разгрузка ковша производится опрокидыванием в желоб, затем одновременно с опусканием стрелы производится поворот желоба на разгрузку.

Новое оборудование обеспечивает: повышение пропускной способности автодорог за счет выполнения погрузки в самосвал в одной полосе движения с ним; увеличение производительности по сравнению с типовым рабочим оборудованием фронтального погрузчика до 70 %, а по сравнению с лаповым погрузчиком до 250 %.

Ключевые слова: транспортно-технологические машины, снегопогрузчики, фронтальные погрузчики, уборка снега, опрокидывающее оборудование, производительность, параметры рабочего оборудования

*S. V. Repin, T. V. Vinogradova, A. V. Nikolaev, V. E. Chechuev
A. A. Abrosimova, V. E. Gordienko*

JUSTIFICATION OF THE LOADER WORKING EQUIPMENT PARAMETERS FOR CLEANING URBAN AREAS FROM SNOW

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

The article is devoted to the substantiation of the parameters of the working equipment and the development of a method for removing snow from urban areas based on the use of front loaders with tipping working equipment. The comparative analysis of traditional methods of snow removal (paw snow loaders, front loaders with a classic bucket) allowed us to identify the shortcomings and limitations of existing methods. It is shown that the proposed snow removal technology, which provides for the use of tipping equipment, allows us to eliminate the identified shortcomings and significantly increase cleaning productivity. The new design of the front loader, equipped with the ability to unload at the rear, provides for the use of standard working equipment with minimal changes, as well as the installation of additional equipment that ensures rear unloading, namely, a chute fixed above the cabin by means of bipedal stands and hydraulic cylinders fixed on the sides of the frame. All operations, except unloading, are performed in the usual way for front loaders. The bucket is unloaded by tipping it into a chute, then simultaneously with the boom lowering, the chute is turned for unloading.

The new equipment provides: increased road capacity due to loading into a dump truck in the same traffic lane as it; increased productivity compared to standard front-end loader equipment by up to 70 %, and compared to a paw loader by up to 250 %.

Keywords: transport and technological machines, snow loaders, front loaders, snow removal, tipping equipment, productivity, parameters of working equipment

Введение

Более 80 % территории Российской Федерации ежегодно сталкиваются с интенсивными снегопадами, объемы которых превышают возможности снегоуборки городских служб [1]. По данным Росгидромета (2024), в среднем за зимний сезон в крупных городах выпадает 150–250 см снега, при этом критическим порогом для оперативной уборки считается 10–15 см за 12 часов.

Отвальные снегоуборочные машины, имеющие высокую технологическую скорость, способны очистить от снега за короткое время основную часть ширины основных городских автомагистралей, образовав валики снега вдоль правых частей дорог [2; 3]. А вот уборка этих валиков представляет собой весьма трудоемкую операцию, требующую применения большого количества специальной техники и автотранспорта. В связи с нехваткой техники валики снега находятся на дорогах длительное время, постепенно слеживаясь, уплотняясь, смерзаясь. А уборка уплотненного снега в разы повышает энергоемкость процесса и снижает производительность. Заледеневший нижний слой снега в валике вообще не поддается уборке и при суровой и снежной зиме имеет тенденцию к росту [4]. С началом весенних оттепелей некоторые недобросовестные коммунальные службы направляют мощные отвальные машины для срезания слоя льда и переброске к середине дороги, что вызывает много-

численные аварии и поломки автотранспорта, особенно легкового.

Уборка валика снега производится в основном лаповыми снегопогрузчиками (ЛС), так как только они способны производить погрузку, находясь в одной полосе с самосвалом [3]. В периоды интенсивных снегопадов применяются шнекороторные снегопогрузчики (ШС), перебрасывающие снег на газоны, находящиеся вдоль дорог (объект рассмотрения – *городские дороги*). ШС могут грузить снег и в самосвалы,двигающиеся рядом с погрузчиками, но при этом занимают две полосы движения, что негативно сказывается на пропускной способности дороги. В недавнем прошлом ШС имели возможность перебрасывать снег в городские реки и каналы. Новые экологические нормы уборки городских территорий запрещают такой вариант снегоуборки. Возможна погрузка и фронтальными погрузчиками (ФП), но тогда занимают как минимум две полосы движения. Следует отметить, что из рассмотренных видов специальной техники ФП являются самым многочисленным и универсальным, а также обладающим высокой производительностью на данном виде работ и способностью грузить слежавшийся и заледеневший снег [3–7].

Несвоевременная ликвидация валиков снега приводит к:

– снижению пропускной способности магистралей на 20–40 %;

- росту аварийности на 5–10 %;
- увеличению логистических издержек предприятий на 15–20 % [7].

Основные причины неэффективности существующих методов уборки:

- дефицит специализированной техники;
- низкая производительность снегопогрузчиков на уборке уплотненного слежавшегося снега [7; 8].

Цель работы – снижение остроты проблемы снегоуборки городских дорог путем применения фронтальных погрузчиков с опрокидывающим оборудованием, позволяющим грузить снег в транспорт, находясь с ним в одной полосе движения.

Сравнительный анализ существующих методов снегоуборки

Положительной стороной применения *лаповых снегопогрузчиков* является последовательное расположение с транспортным средством (ТС) в процессе погрузки, а также удобное перемещение самосвала вперед кабиной, безопасность выполнения работы. В результате перекрывается только одна полоса движения транспорта.

Следует отметить, что лаповые снегопогрузчики – это узкоспециализированные машины, использование которых составляет 10–20 % годового фонда рабочего времени. А при их рыночной цене 7–8 млн руб. себестоимость работ оказывается весьма высокой.

Однако появилась информация об оснащении лаповых снегопогрузчиков сменным обо-

дованием для летней уборки дорог. Так, снегоуборочная машина DM-09 может быть переоборудована в подметальную машину для эксплуатации в летний и весенне-осенний период [9].

Недостатки ЛС:

- низкая производительность при удалении слежавшегося снега (плотность свыше 450 кг/м^3);
- невозможность захватывать нижний уплотненный слой снег в валике, а тем более заледеневший.

Следует отметить, что указываемая в технической характеристике производительность погрузки до $350 \text{ м}^3/\text{ч}$, является сильно завышенной. Не вдаваясь в математический анализ формул для расчета производительности, позволяющим выйти на нужный результат [10], можно воспользоваться старым простым методом – хронометрированием. Тем более что имеется в интернете большое количество видеоматериалов. Так, снегопогрузчик лаповый СнП-17 мощностью 100 кВт загружает самосвал ровно за 5 мин (хронометраж по видео [11]).

На рис. 1 показана погрузка в самосвал КамАЗ-5511 вместимостью $10,5 \text{ м}^3$ (с нарощенными бортами). Тогда техническая производительность составит при непрерывной загрузке $\Pi_t = 10,5 \cdot 60/5 = 126 \text{ м}^3/\text{ч}$. До 20 % времени работы занимают манипуляции с подъездом-отъездом транспорта. Поэтому реальная производительность составит около $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, что значительно ниже и паспортной, и рассчитываемой по рекомендациям [10].



Рис. 1. Снегопогрузчик лаповый СнП-17 загружает снег в самосвал

Фронтальные погрузчики, в дополнение к указанным выше преимуществам, обладают также:

- высокой мобильностью – способностью перемещаться своим ходом с высокой скоростью (более 20 км/ч);
- большой вместимостью ковша, более двух кубометров, обеспечивающую высокую производительность погрузки.

Их главные недостатки при использовании на погрузке снега – использование как минимум двух полос движения и длительный рабочий цикл, связанный с необходимостью маневрирования вследствие фронтальной загрузки и фронтальной же разгрузки в транспорт. Известны фронтально-опрокидывающие погрузчики, захватывающие сыпучий материал спереди, а разгружающие назад, перенося ковш с материалом над кабиной, например, фронтально-перекидной погрузчик ПФП-1,2 Волгоградского тракторного завода на базе ДТ-75 [12]. Данный погрузчик не имеет указанных недостатков, однако такие машины малочисленны и об-

ладают низкой мобильностью, так как выполнены на базе гусеничных тракторов.

Описание новой конструкции и расчет производительности фронтального погрузчика

В статье предлагается новая конструкция ФП, снабженная возможностью задней разгрузки. Новая конструкция предусматривает использование типового рабочего оборудования с минимальными изменениями, а также установку дополнительного оборудования, обеспечивающего заднюю разгрузку: желоб, закрепленный над кабиной посредством двуногих стоек и гидроцилиндров, закрепленных с боковых сторон на раме (рис. 2). Все операции кроме разгрузки производятся обычным для ФП способом. Разгрузка ковша производится опрокидыванием в желоб, затем одновременно с опусканием стрелы производится поворот желоба на разгрузку. Очередность и время выполнения операций рабочего цикла приведены в таблице в сравнении с работой обычного фронтального погрузчика (рис. 3 и 4).

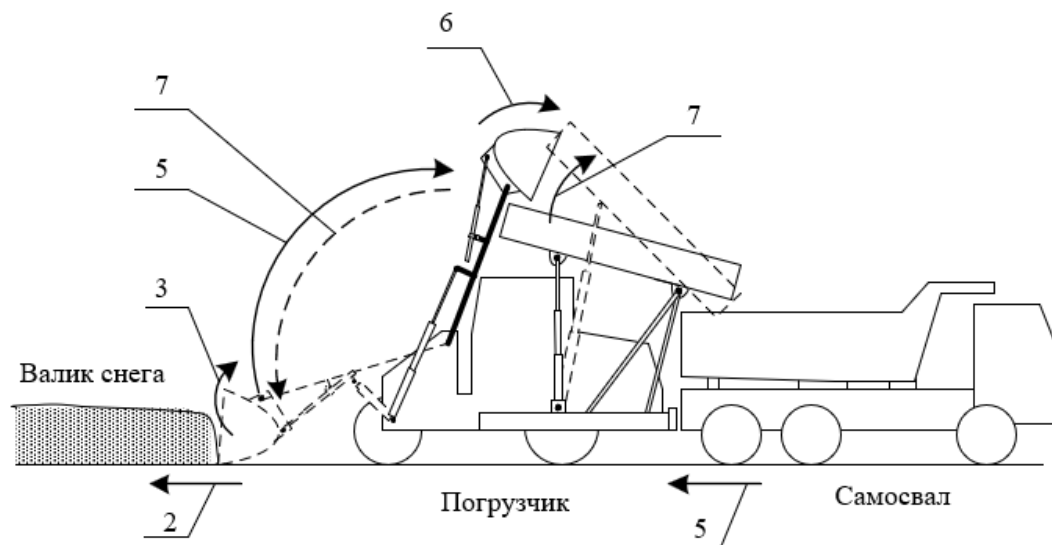


Рис. 2. Конструкция и работа предлагаемого ФП с задней разгрузкой (номера указаны элементы времени цикла, приведенные в таблице)

Анализ времени рабочего цикла погрузчика «Амкор 332В» (рис. 3) при загрузке самосвала выполнен с использованием хронометрирования по видео [13] согласно приведенной на рис. 4 схеме выполнения работы. Ре-

зультаты хронометрирования показаны в таблице. Визуально оценивается: коэффициент загрузки ковша равен 1,0–1,1; высота валика снега около 1 м; ширина валика не превышает ширины ковша.



Рис. 3. Фронтальный погрузчик «Амкодор 332В» с ковшом вместимостью $2,9 \text{ м}^3$ (увеличенный) и мощностью 96,5 кВт

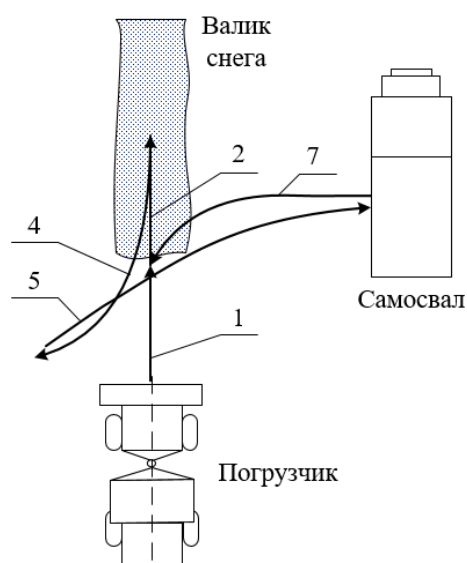


Рис. 4. Схема перемещений при выполнении работы по загрузке снега погрузчиком «Амкодор 332В» (номера указываются элементы времени цикла, приведенные в таблице)

**Результаты замера времени выполнения операций погрузчиком «Амкодор 332В»
и использование их для расчета времени цикла предлагаемого погрузчика**

№ операции	Наименование операции ипового ФП	Длина пути перемещения, м	Время выполнения операции т иповым ФП, с	Наименование операции ФП с задней разгрузкой	Время выполнения операции ФП с зад- ней разгрузкой, с
1	Подъезд к месту забора снега	3	4	Нет	0
2	Забор снега	4	5	Забор снега	5
3	Поворот ковша	0	3	Поворот ковша	3
4	Отъезд назад с разворотом	6	7	Нет	0
5	Подъезд к самосвалу с подъемом стрелы	10	10	Подъем стрелы, подъезд само- свала к ФП	6

Окончание таблицы

№ операции	Наименование операции ипового ФП	Длина пути перемещения, м	Время выполнения операции т иповым ФП, с	Наименование операции ФП с задней разгрузкой	Время выполнения операции ФП с задней разгрузкой, с
6	Разгрузка ковша	0	6	Разгрузка ковша	6
7	Отъезд назад с разворотом и опусканием стрелы	4	6	Опускание стрелы, поворот ковша, поворот желоба	4
8	Перемещение самосвала	4	0	Нет	0
9	Время рабочего цикла, с		41		24

На основании выполненных замеров рассчитана производительность в компьютерной программе (рис. 5).

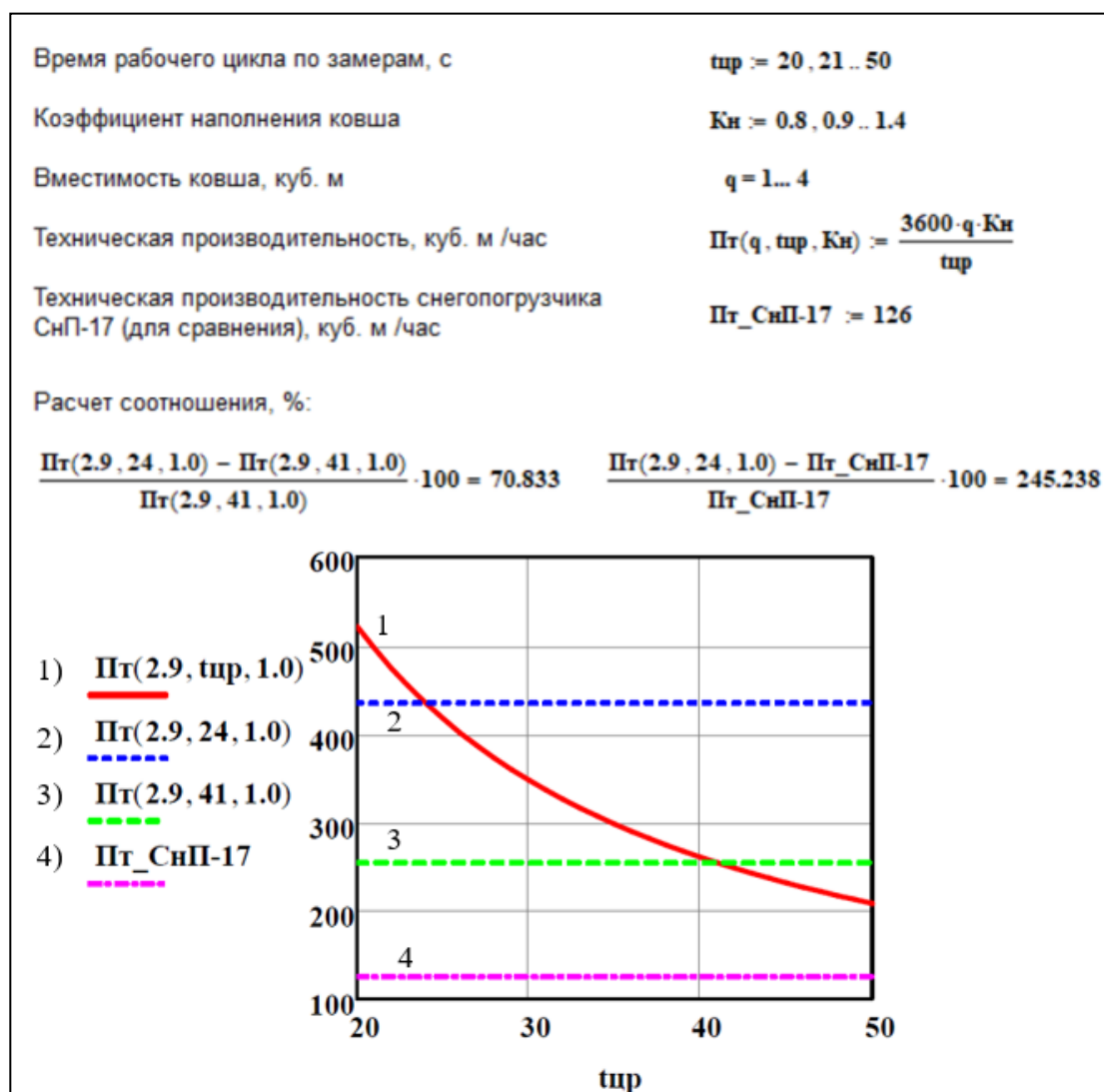


Рис. 5. Расчет производительности ($\text{м}^3/\text{ч}$) погрузчика в зависимости от времени рабочего цикла (с):
 1 – общий вид зависимости производительности от времени цикла; 2 – производительность предлагаемого погрузчика;
 3 – производительность типового погрузчика «Амкодор 332В»; 4 – производительность снегопогрузчика СнП-17

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что разработка инновационного метода уборки снега с использованием фронтальных погрузчиков, оснащенных опрокидывающим рабочим оборудованием, является технологически и экономически обоснованным решением для городских территорий РФ. Новое оборудование обеспечивает:

– повышение пропускной способности автодорог за счет выполнения погрузки в самосвал в одной полосе движения с ним;

– увеличение производительности по сравнению с типовым рабочим оборудованием фронтального погрузчика до 70 %, а по сравнению с лаповым погрузчиком – до 250 %.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательских работ в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2025 году.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кобышева, Н. В. Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере / Н. В. Кобышева, Е. М. Актенцева, Л. П. Галюк. – СПб.: Кириллица, 2015. – 214 с.
2. ОДМ 218.5.001-2008. Методические рекомендации по очистке дорог от снега. – М.: Росатодор, 2008. – 80 с.
3. Петров, А. Н. Современные технологии зимнего содержания дорог / А. Н. Петров. – М.: Транспорт, 2020. – 175 с.
4. Top 5 Trends in Snow Removal Technologies. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://attentive.ai/blog/top-5-trends-in-snow-removal-technologies> (дата обращения 03.04.2025 г.).
5. 7 Creative Snow Removal Methods for Winter. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.travelwithcasey.com/7-creative-snow-removal-methods-for-winter> (дата обращения 03.04.2025 г.).
6. Васильев, А. П. Ремонт и содержание автомобильных дорог: справочная энциклопедия дорожника (СЭД). Том II / А. П. Васильев [и др.]; под ред. А. П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2004. – 507 с.
7. Воскресенский, Г. Г. Научные основы проектирования рабочего оборудования для разрушения уплотненного снега на автомобильных дорогах: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.05.04 / Г. Г. Воскресенский. – Хабаровск, 2011. – 38 с.
8. Мерданов, Ш. М. Ресурсосбережение при уборке снега в городских условиях / Ш. М. Мерданов, В. В. Конев, В. Л. Ефимова, А. В. Балин // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1 (часть 2). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2803 (дата обращения 03.04.2025 г.).
9. Снегопогрузчик лаповый ДМ-09. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dormashina.ru/produkcija/snegouborochaya-tehnika/dm09.html> (дата обращения 03.04.2025 г.).
10. Щемелев, А. М. Определение производительности одноковшовых фронтальных погрузчиков / А. М. Щемелев, А. Е. Науменко, А. Д. Бужинский, А. С. Шибеко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 4 (21). – С. 55–61.
11. Снегопогрузчик лаповый СНиП-17. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dzen.ru/video/watch/63dc-ddf810b7fd1be3231088?f=d2d> (дата обращения 03.04.2025 г.).
12. Фронтально-перекидной погрузчик ПФП-1,2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vgtz-traktor.ru/produkcija/navesnoe-oborudovanie/pogruzchik-frontalno-perekidnoi-pfp-1-2?ysclid=m77d2lpgr789406775> (дата обращения 03.04.2025 г.).
13. Погрузка снега погрузчиком «Амкодор 332В». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yandex.ru/video/preview/15002581787967270687> (дата обращения 03.04.2025 г.).
14. Самущенко, Л. А. Погрузчик универсальный Амкодор 332С4–01. Руководство по эксплуатации 333В.00.00.000РЭ / Л. А. Самущенко, Л. А. Сиротина, Т. Д. Таршикова, Н. И. Ярошевич. – М.: ОАО «АМКО-ДОР» – управляющая компания холдинга, 2017. – 242 с.

УДК 621.431/891

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-3-52-70-77

Д. А. Козлов¹, А. В. Яхин¹, И. Р. Нигматуллин²

ОБОБЩЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ БЕЗОТКАЗНОСТИ МОТОРНОГО МАСЛА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ДИАГНОСТИКЕ ДВИГАТЕЛЯ

¹ Уфимский университет науки и технологий

² ООО «Химмотолог»

umvachesey11@mail.ru, nazart7@mail.ru, temp.ilshat@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Азат Варисович Яхин, nazart7@mail.ru

В статье представлен анализ системы, позволяющей в режиме реального времени осуществлять мониторинг работоспособности моторного масла в ДВС посредством регистрации параметров продуктов износа, диэлектрической проницаемости масел и его температурного режима в карттере работающего двигателя. Предложен обобщенный показатель безотказности работающего моторного масла, позволяющий на ранней стадии выявить причины повышенного износа ДВС и своевременно устранить их.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания (ДВС), обобщенный показатель безотказности для диагностики (ОПБД), продукты износа, диэлектрическая проницаемость, температура масла, работоспособность масла, показатели качества масла, диагностический прибор

D. A. Kozlov¹, A. V. Yakhin¹, I. R. Nigmatullin²

GENERALIZED RELIABILITY INDICATOR OF ENGINE OIL AND ITS APPLICATION IN ENGINE DIANOSTICS

¹Ufa University of Science and Technology

²LLC «Chemmotologist»

The study presents an analysis of a system that enables real-time monitoring of engine oil performance in internal combustion engines (ICE) by recording parameters related to wear products, the dielectric permittivity of oils, and the thermal conditions within the engine crankcase. A generalized reliability indicator for operating engine oil is proposed, which allows for the early detection of factors contributing to increased engine wear and their timely elimination.

Keywords: internal combustion engine (ICE), generalized reliability indicator for diagnostics (GRID), wear products, dielectric permittivity, oil temperature, oil performance, oil quality indicators, diagnostic device

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – сложное технологическое устройство, которое включает в себя множество деталей и механизмов, осуществляющих преобразование химической энергии топлива в механическую работу. Внутри двигателя топливо, смешиваясь с воздухом, воспламеняется, а развивающиеся при этом газовые потоки создают давление. Это приводит в движение поршни, которые, передавая свою энергию на коленчатый вал, генерируют вращательный момент. Данный процесс не может происходить без образования механических частиц, нагара, коррозии при контакте верхних слоев механизмов, что обусловлено неровностью поверхностей деталей и проникновением сторонней жидкости в различные отделы ДВС [1]. В настоящее время существующие технологии не позволяют создавать идеальные металлические поверхности, именно поэтому для минимизации трения и стабилизации температурного режима в ДВС используется моторное масло, играющее роль смазывающей жидкости и теплоносителя (для поддержания оп-

тимального рабочего диапазона температур [2].

Анализ состояния масла позволяет диагностировать и предупредить процесс износа ДВС, в соответствии с критериями надежности, установленными ГОСТ 27.002-83.

Для объективной оценки состояния рабочих деталей и узлов трения двигателя, а также их способности выполнять заданные функции, определяются предельные показатели износа и температуры масла в картере. Эти параметры характеризуют эффективность работы смазочного материала и самого двигателя. Если в ходе эксплуатации износ и температура масла не превышают установленные пределы, узлы и детали продолжают функционировать в нормальном режиме. В случае выхода этих параметров за допустимые границы начинается аварийный режим работы, что повышает риск отказа. Надежность узла трения определяется количеством отказов в заданный временной интервал, выраженным через интенсивность отказов. На рис. 1 показана классическая зависимость износа от времени эксплуатации техники.

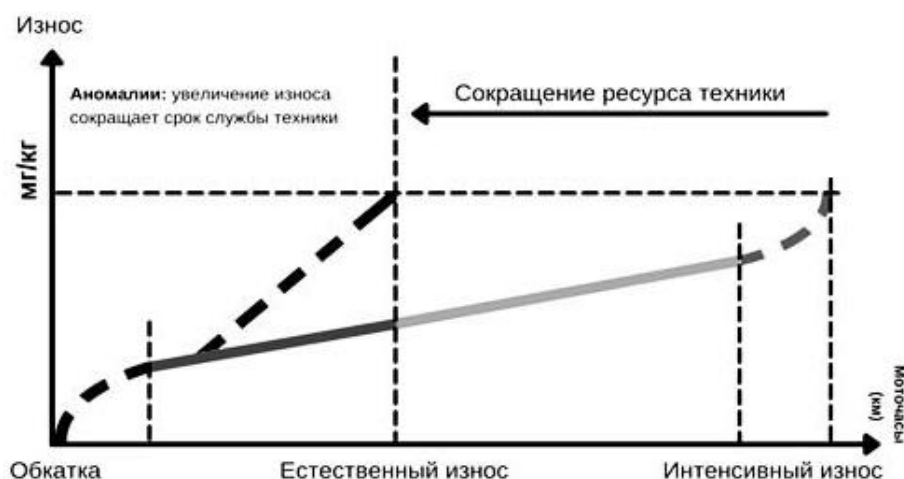


Рис. 1. График протекания износа двигателя с пояснениями

Износ деталей проходит три основные стадии. На первом этапе (обкатка) скорость изнашивания повышена из-за сглаживания шероховатостей сопрягаемых поверхностей.

Вторая стадия (стабильный износ) отличается равномерным изнашиванием, являясь наиболее продолжительным этапом эксплуатации узлов и деталей. График с пунктирными линиями сигнализирует о резком увеличении износа, требующем детального анализа причин. При длительном использовании оборудования ресурс его элементов снижается, что требует сокращения интервалов технического обслуживания – замены масла, его марки, фильтров и проведения ремонта.

Заключительная стадия (интенсивный износ) характеризуется значительным увеличением скорости разрушения деталей и сопряжен-

ных узлов, ростом зазоров и другими негативными явлениями. На этом этапе вероятность выхода из строя детали существенно возрастает, а также может спровоцировать поломку смежных элементов. В некоторых случаях подобный износ не приводит к немедленному отказу, однако эксплуатация техники становится экономически нецелесообразно.

Таким образом, определение критериев износа ДВС на ранней стадии их возникновения и повышение показателей качества смазочных материалов являются актуальными задачами в рамках контроля качества работы ДВС. Визуализация зависимости скорости износа двигателя и состояния масла (рис. 2) наиболее ярко отражает качественное состояние процесса, в контексте несоответствия нормальным условиям работы [3].

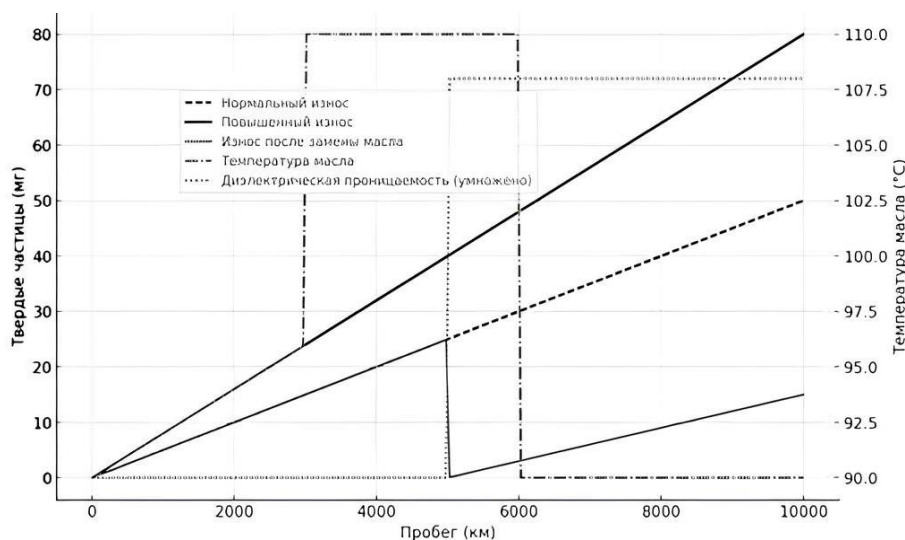


Рис. 2. Графики скорости износа двигателя и состояния масла

Известны методы расчета обобщенного показателя работоспособности ДВС [1], роль которых заключается в математическом расчете критериев состояния моторного масла.

Для обобщенного описания процесса влияния изнашивания двигателя на состояние масла используются положения равновесной и неравновесной термодинамики, согласно которым изменение состояния работающего в ДВС моторного масла определяется производством энтропии. В свою очередь, производство энтропии в неравновесной системе обусловлено изменением теплопроводности, скорости диффузии, появлением вязкого потока и химическими превращениями в моторном масле. Для упрощения считают, что первые три из указанных

составляющих пренебрежительно малы по сравнению с последней. Тогда основной вклад в изменение свойств масел будут вносить термохимические процессы, протекающие в масле в различных зонах смазываемого объекта (двигателя) [4].

Исходя из основных положений равновесной термодинамики, состояние масла, как любой системы, описывается выражением:

$$T \cdot dS = dU + p \cdot dV - \sum (\mu_i \cdot C_p) \quad (1)$$

где T – температура системы; U – внутренняя энергия системы; p – давление; V – объем; μ – электрохимический потенциал; C_p – концентрация ПАВ (поверхностно-активных веществ).

Применительно к смазочной системе смазываемого объекта примем p и $V=const$ ($dV=0$).

Допустим также, что в масле в процессе его работы образуются кислые (C_K) и вязкие (C_B) продукты, в то время как твердые продукты (частицы нагара, износа и т. п.) попадают в масло в основном извне. Одновременно в масле происходит срабатывание функциональных присадок или расходование природных ПАВ, препятствующих различного рода термохимическим превращениям (C_M). Изменение энтропии системы будет равно:

$$T \cdot dS = dU - \mu_M \cdot dC_M + \mu_K \cdot dC_K + \mu_B \cdot dC_B$$

Примем, что внутренняя энергия масла в основном изменяется за счет попадания в него твердых частиц:

$$dU = \sigma \cdot dA,$$

где σ – поверхностная энергия на границе раздела фаз; A – величина поверхности раздела.

В свою очередь,

$$dA = r^2 \cdot dn,$$

где n – число твердых частиц; r – средний радиус частицы в монодисперсной системе.

В этом случае:

$$TdS = \sigma \cdot r^2 \cdot dn + \mu \cdot (dC_M + dC_K + dC_B),$$

при условии, что $\mu = \mu_M = \mu_K = \mu_B$. При наличии в смазочной системе эффективно работающих средств очистки, активно удаляющих из масла твердые частицы, его внутренняя энергия будет изменяться пропорционально интенсивности химических превращений, протекающих в системе:

$$TdS = \mu \cdot (dC_M + dC_K + dC_B).$$

Величины C_K , C_M , C_B взаимосвязаны между собой. Первые два показателя характеризуют накопление в масле продуктов его термохимических превращений, последний – запас ПАВ, противодействующих процессу старения. При достижении предела работоспособности, очевидно, имеет место равновесие $dC_K + dC_M = dC_B$, следовательно, вне зависимости от подхода, объективное представление о состоянии моторного масла возможно получить на основании оценки степени термохимических превращений или же остаточной способности масла препятствовать этим превращениям. Применительно к маслам рассмотренные обобщенные характеристики можно выразить конкретными показателями, поддающимися надежному контролю на практике, и, таким образом, более удобными для практических расчетов. Таковыми могут быть либо наиболее информативные

единичные, либо комплексные показатели (сочетание единичных показателей) для получения более полного представления об изучаемом предмете. Обширные научные исследования, проведенные во многих странах, показали высокую надежность диагностических прогнозов, основанных на результатах анализов работавших масел. Однако обилие единичных показателей и близость некоторых из них между собой по физической сути затрудняет оперативность оценки работоспособности масла. Упрощение оценки качества работающих масел без снижения надежности можно сделать при применении комплексных показателей смазочных материалов.

Другим методом является определение обобщенных характеристик масла, которые можно выразить конкретными показателями, поддающимися контролю на практике, и, таким образом являющимися более удобными для практических расчетов. В работе [5] описан показатель (Π), представляющий собой безразмерный критерий состояния работавшего масла и позволяющий оценить уровень его эксплуатационных свойств во времени:

$$\Pi = \Delta\vartheta \cdot \left(\frac{\Delta KЧ}{ЩЧ} \right) \cdot D_K \cdot D_C \quad (2)$$

где $\Delta\vartheta$ – изменение вязкости; $\Delta KЧ$ – изменение кислотного числа; $ЩЧ$ – щелочное число; D_K – светопоглощение с использованием красного светофильтра; D_C – светопоглощение с использованием синего светофильтра.

Его сомножители выбраны на основе ранее проведенных расчетов и характеризуют прирост вязкости масла, накопление в нем дисперсной фазы и средний размер ее частиц, а также изменение кислотности масла за время окисления и сохранившейся к рассматриваемому моменту времени щелочной запас. Однако у данного метода есть и недостатки, на которые стоит обратить внимание в контексте практической, например: непригодность для экспресс-анализа, трудоемкое определение щелочного числа.

Существует также комплексный показатель ($KП$) для оценки динамики изменения качества масел к моменту времени τ [5]:

$$KП = \frac{C_{щ}}{(\Delta C_K \cdot D)} \quad (3)$$

где ΔC_K – изменение кислотного числа; D – оптическая плотность; $C_{щ}$ – щелочное число масла.

Возможно использование этого способа для прогнозирования уровня эксплуатационных

свойств масел на любом этапе их жизненного цикла, но он, как и предыдущий метод, не актуален при экспресс-анализах.

Анализ вышеизложенных методов расчета обобщенного показателя работоспособности масла ДВС посредством математического расчета критериев его состояния указывает на их малоактуальность, с точки зрения возможности повседневного практического применения и оперативного мониторинга. Иными словами, перечисленные методы не позволяют производить экспресс-оценку за короткий промежуток времени. Разработка инновационного подхода, позволяющего объективно оценивать состояние работающего масла, должна проводиться в направлении установления наиболее информативных показателей, во взаимосвязи с ресурсом, надежностью и эксплуатационными характеристиками ДВС, включая пусковые свойства, экономичность по расходу масла и топлива, скорость изнашивания основных деталей. Использование информативных показателей состояния моторных масел дает возможность отработать требования к оперативным методам контроля в условиях эксплуатации [6].

Существующие методы расчета браковочных показателей масла [7; 8] позволяют предложить формулу для реализации нового способа оценки работоспособности ДВС, учтенного в предлагаемой новой модели обобщенного показателя безотказности при прогнозировании работоспособности моторного масла внутри ДВС, позволяющей использовать его в режиме реального времени [9]. Данная формула получена эмпирическим методом, по результатам статистических исследований, полученных в ходе исследования моторных масел автомобильной техники, находящейся в эксплуатации. В процессе исследований были проанализированы параметры моторного масла, влияющие на надежность работы ДВС. На их основе проведен подбор коэффициентов, обеспечивающих наиболее точное соответствие теоретических расчетов реальным условиям.

Сущность применения показателя заключается в определении временной границы, при которой должна осуществляться замена отработанного масла. Предлагаемая модель расчета обобщенного показателя безотказности для диагностики (ОПБД) моторного масла:

$$ОПБД = \left(\frac{TЧ}{ПДП} \right) \cdot \frac{(T_{исх} - T_0)}{100} \quad (4)$$

где $TЧ$ – показатель количества продуктов износа на датчике износа, мг; $ПДП$ – прирост ди-

электрической проницаемости (степени окисления масла и наличия воды в масле) разница между диэлектрическими проницаемостями, отработанного и работающего масел; $T_{исх}$ – температура масла в картере работающего ДВС, °C; T_0 – температура свежего масла в картере работающего ДВС в первые часы работы, до прогрева.

В работе [3] предложено устройство для определения работоспособности моторного масла по вышеприведенным показателям, состоящий из: гибкого металлического щупа – аналога масляного щупа автомобиля, с установленными в нем датчиками определения продуктов износа (в виде индуктивной катушки), определения содержания воды и степени окисления моторного масла по диэлектрической проницаемости, а также вычислительного блока с дисплеем, устанавливаемым в кабине автомобиля. Данное устройство реализовано в виде диагностического прибора МсТ (рис. 3), в настоящее время проходящего опытную апробацию в профильной организации, занимающейся контролем качества горюче-смазочных материалов ООО «Химмотолог», г. Уфа

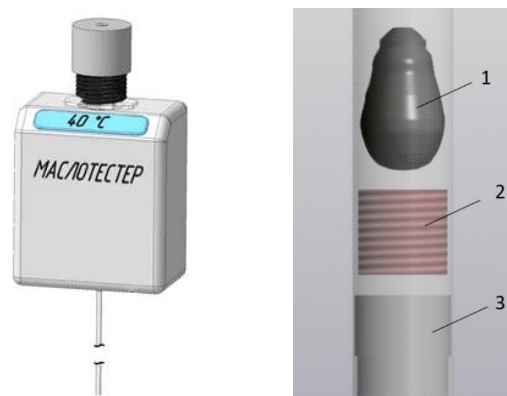


Рис. 3. Устройство диагностирования масла МсТ: 1 – температурный датчик; 2 – датчик диэлектрической проницаемости; 3 – магнитный датчик

Определение ОПБД сводится к вычислениям с использованием показателей качества моторного масла, определяемых диагностическим прибором. Также, для получения корректных результатов, необходимо учитывать, что при несоответствии хотя бы одного показателя норме, установленной по статистическим данным измерений – масло считается неработоспособным.

Для апробации предложенной методики на базе ООО «Химмотолог» были проведены исследования трех образцов масла М-10ДМ (вязкость 10W40), используемого в широко распро-

страненном двигателе КамАЗ–740.30–260. Исходные результаты испытаний, полученные с использованием специального лабораторного

оборудования (рис. 4 и 5), приведены в табл. 1, для сравнения представлены показатели качества согласно ГОСТ 8581-78.



Рис. 4. Спектральный анализатор нефтепродуктов OSA-Metalab



Рис. 5. Анализатор AN-100 с датчиком диэлектрической проницаемости

Таблица 1

Результаты анализов, полученных лабораторным путем

Параметры масла	Исследуемый образец			
	№ 0 (свежее масло М-10ДМ)	№ 1	№ 2	№ 3
Пробег автомобиля, км	0	4180	11430	22890
Кинематическая вязкость при 100 °С, сСт	>11,4	6,569	9,724	11,293
Температура вспышки в открытом тигле, °С	220	163	213	210
Содержание воды, %	0	0,18	0,09	0,04
Щелочное число, мг КОН/г	8,2	5,32	7,95	6,81
Масляное пятно, у. е.	Не менее 0,35	0,36	0,42	0,51
Механические примеси, %	отсутствие	0,2	0,1	0,06
Показатель износа при 100 кгс в течение 10 с, мм	<2,0	2,51	2,23	2,21

В табл. 2 приведены показатели, полученные диагностическим прибором МсТ для определения качества моторного масла в режиме

реального времени и используемые для расчета показателя ОПБД.

Таблица 2

Результаты анализов, полученных прибором МсТ

Показатель	Исследуемый образец		
	№ 1	№ 2	№ 3
Пробег автомобиля, км	4180	11430	22890
<i>Параметры отработанного масла</i>			
Кол-во частиц износа	100	41	14
Показатель температуры, установленный на данном пробеге	121	105	98
Показатель диэлектрической проницаемости	2,96	2,38	2,49
<i>Параметры чистого масла</i>			
Кол-во частиц износа, мг	0	0	0
Температура свежего масла, в первые часы работы ДВС	94	95	93
Показатель диэлектрической проницаемости, вода отсутствует	2,24	2,24	2,24

Пример расчета ОПБД для образца № 1:

$$\left(\frac{100}{0,72}\right) \cdot \frac{105 - 95}{100} = 37,50$$

Результаты расчетов для каждого образца масел представлены ниже в табл. 3:

Таблица 3

Результаты расчетов ОПБД

Исследуемый образец	Пробег, километры	Значение ОПБД работающих моторных масел
№ 1	4180	37,50
№ 2	11430	29,29
№ 3	22890	19,60

Произведенный расчет указывает, что в моторном масле дизельного двигателя КамАЗ-740.30-260 при содержании твердых частиц общей массой 100 мг, диэлектрическая проницаемость превышает значение свежего масла на 0,72. Кроме того, в первые часы работы, до достижения рабочей температуры, зафиксировано повышение температуры масла на 27 °С по сравнению с исходным значением. Данные параметры свидетельствуют о значительном ухудшении эксплуатационных характеристик смазочного материала и могут рассматриваться

в качестве браковочных критериев. Полученные результаты указывают, что по мере приближения условного показателя к значению 20 происходит существенное снижение качества масла, его деградация.

Анализ данных, представленный в табл. 1 и табл. 2, позволяет произвести всестороннюю оценку качества моторного масла. В первой таблице приведены лабораторные показатели, характеризующие физико-химические свойства масла при данном пробеге, показатели, сильно отклоняющиеся от нормы выделены жирным шрифтом. Табл. 2 содержит результаты, полученные с использованием нового прибора. Сопоставление данных обеих таблиц демонстрирует высокую степень совпадения ключевых параметров, что подтверждает их корреляцию и достоверность измерений. На основании этого можно сделать вывод о корректном применении формулы в рамках работы МсТ. Это также подтверждается графиком на рис. 6, который отражает мониторинг измерений в реальном времени с помощью прибора МсТ и интегрированное в него критическая граница ОПБД, согласно которой образец масла 1 имеет наибольшее отклонение от браковочного значения.

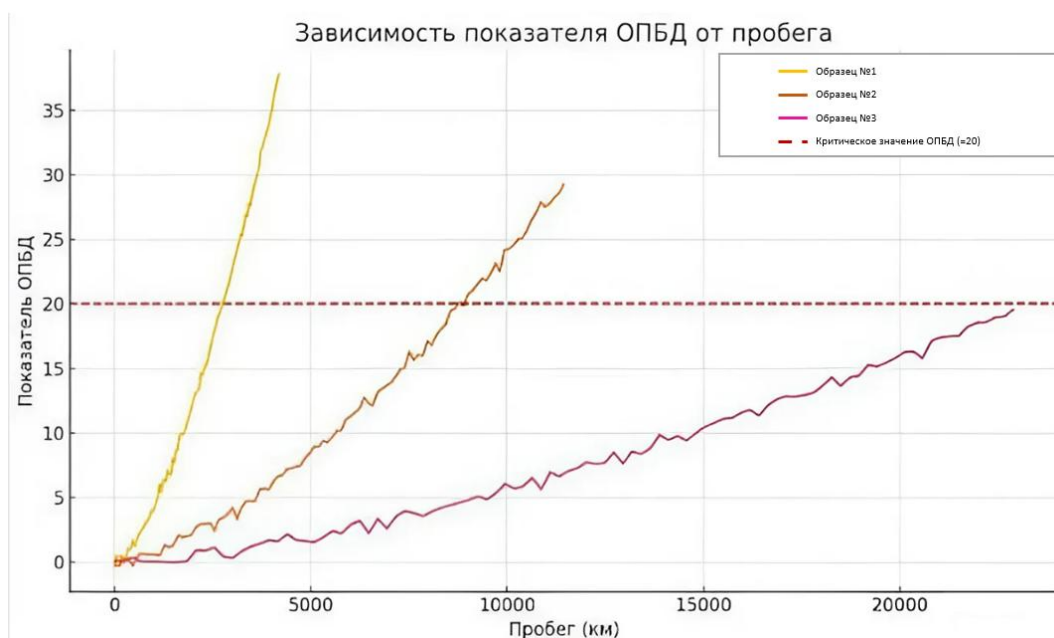


Рис. 6. Предел допустимого ОПБД

Исходя из представленных данных, состояние масла образца под номером 1 исчерпало свою пригодность, это сигнализирует о необходимости проведения его замены.

Очевидно, что незначительная доработка программного кода устройства, предложенного в работе [3], позволяющего в автоматическом режиме осуществлять расчет ОПБД и указы-

вать его критическое значение на информационном мониторе водителя, позволит на качественно ином уровне повысить информативность состояния рабочего моторного масла в ДВС и, в свою очередь, повысить его показатели надежности.

Представленный в работе показатель для диагностирования масла в режиме реального времени, который может использоваться в ДВС, демонстрирует значительный потенциал для совершенствования оценки эксплуатационных характеристик смазочных материалов. Исследования показали, что его применение позволяет не только анализировать состояние масла, но и определять браковочные значения масляных показателей. Все это положительно влияет на своевременность проведения технического обслуживания, снижает необходимость лабораторных исследований, что способствует общей оптимизации работы по контролю качества моторного масла в ДВС. Разработанный прибор позволяет применять ОПБД для корректной работы системы диагностирования, тем более, измерения, проводимые в режиме реального времени с облегченным для восприятия интерфейсом, позволят значительно расширить спектр аналитических возможностей поиска неисправностей ДВС для людей, эксплуатирующих автомобильную технику.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников, В. Д. Критерии работоспособности моторных масел / В. Д. Резников, Э. Н. Шипулина. – ХТТМ, № 9, 1989. – С. 24.
2. Кузменко, М. Л. Диагностика масел и двигателей Д-30 КП 3-й серии ОАО «НПО Сатурн» по состоянию при их эксплуатации / М. Л. Кузменко, А. А. Элькес // Контроль, диагностика, 2003. – № 12. – С. 16–18.
3. Козлов, Д. А. Диагностика двигателей внутреннего сгорания по состоянию масла, как способ повышения надежности военной автомобильной техники [Электронный ресурс] / Д. А. Козлов, А. В. Яхин, И. Р. Нигматуллин // Мавлютовские чтения, гор. Уфа, 25–29 ноября 2024 г. – Т. 8. – С. 92–99.
4. Лаши, В. Л. Повышение работоспособности моторных масел в условиях эксплуатации / В. Л. Лаши, А. С. Меджибовский, Е. М. Мещерин, Г. И. Шор. – М.: 2003. – С. 52.
5. Гришин, Н. Н. Химия и технология топлив и масел / Н. Н. Гришин, В. Л. Лаши. – 2003. – № 1–2. – С. 52–53.
6. Патент РФ №2731818 Нигматуллин Р. Г., Нигматуллин И. Р. Способ экспресс анализа присадок, смазочных материалов, технических жидкостей, включая отработанные (варианты). Заяв. 01.04.2019, опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. – С. 14.
7. Бедрик, Б. Г. Смазочное масло как элемент конструкции неразрушающего контроля и диагностики техники при эксплуатации по состоянию / Б. Г. Бедрик // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 5.
8. Диагностика технического состояния смазываемых узлов трения по параметрам продуктов износа в масле // «Трение и смазка в машинах и механизмах». – 2006. – № 8. – С. 18–21.
9. Нигматуллин, Р. Г. Диагностика ДВС по анализу моторного масла / Р. Г. Нигматуллин, И. Р. Нигматуллин. – Уфа: Уфимский полиграфкомбинат. – 2011. – С. 95.

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 2025 г. (научные издания). Поз. № 19ж. Дата выхода в свет 16.09.2025 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 8,96.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 336.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научно-техническом журнале «Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области экономики.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Диск должен быть вложен в отдельный конверт, на этикетке указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, где работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.